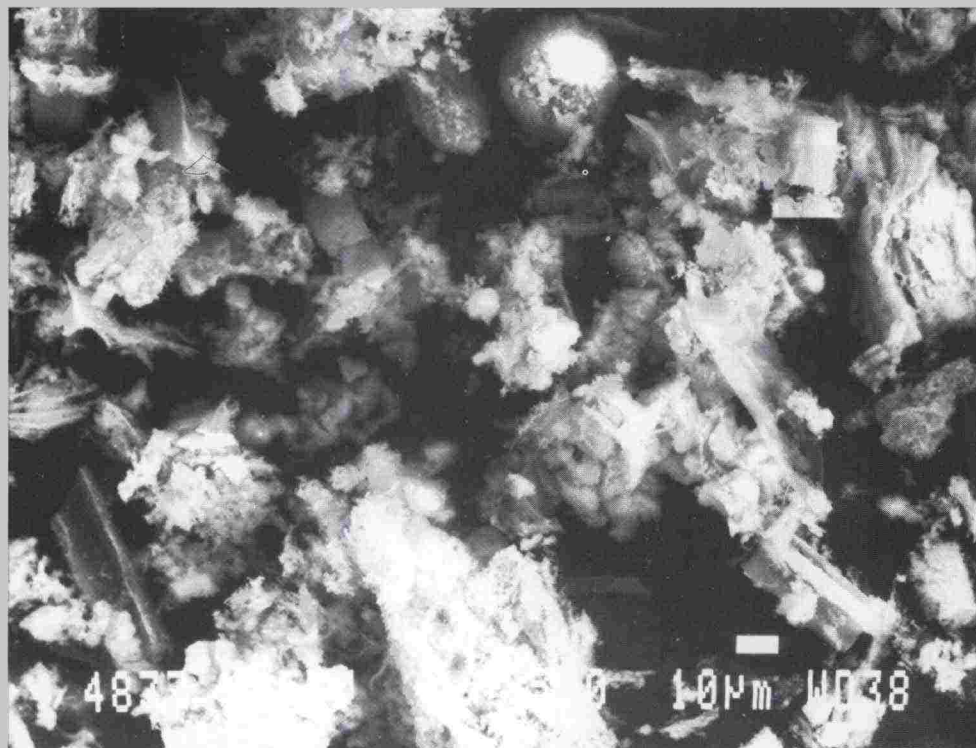


Turve- ja puutuhkan käyttö SMA-päällysteen kuidun korvaajana

Esiselvitys



Tielaitoksen
selvityksiä
15/1996

Helsinki 1996

Kehittämiskeskus

Tielaitoksen selvityksiä
15/1996

Risto Alkio, Jarmo Vuorinen

**Turve- ja puutuhkan käyttö
SMA-päällysteen kuidun korvaajana**

Esiselvitys

Tielaitos
Kehittämiskeskus

Helsinki 1996

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-199-3
TIEL 3200384
Oy Edita Ab
Helsinki 1996

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi

Tielaitos

Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721
1.10.1996 alkaen: 0204 44 150

Aiheluokka: 33, 42, 55

Asiasanat: lentotuhka, täytejauhe, kuitu, tiivistettävyyys, päällyste

TIIVISTELMÄ

Tutkimus käsittelee esitutkimusluonteisesti turve- ja puutuhkien käyttöä SMA-päällysteessä kuidun korvaajana. Tuhkia kokeiltiin myös asfalttiasfaltin täytejauheena tuhka- ja kalkkikivijauheseoksena. Kaikkiaan eri tuhkia hankittiin 13 eri paikkakunnalta. Näistä tuhista 7 oli peräisin pääosin turvetta polttavista kaukolämpölaitoksista sekä 6 massa- ja paperiteollisuudesta. Alkuperäisten, seulomattomien tuhkan ominaispinta-alat vaihtelivat välillä 4,0 - 97,3 m²/g ja hienoainespitoisuudet (alle 0,063 mm materiaali) välillä 17 - 92 %.

Massakokeisiin valittiin neljä tuhkaa. Sitoutumiskokeiden perusteella tuhkiille, joilla oli suurimmat ominaispinta-ala- (alkuperäinen näyte), vedenadsorptio- (%) ja hehkutushäviöarvot, saatiin riittävä sitoutuminen. Tulokset olivat edellä mainitun kaltaisia myös täytejauhekokeessa, jossa täytejauheena (10 %) oli tuhkan ja kalkkikivijauheen seos (1:1).

Massakokeet tehtiin SMA 18-massalla, jonka kiviaineksena käytettiin Koskenkylän kiveä. Kokeisiin valittiin lähinnä ominaispinta-alan perusteella neljä erilaista tuhkaa. Tuhkan vaikutus massojen suhteitusominaisuuksiin testattiin ICT-kiertotiivistimellä. Kokeissa kahta suuren ominaispinta-alan omaavaa tuhkaa käytettiin erikseen sekä pelkästään kuidun korvaajana että kuidun korvaajana ja täytejauheena samanaikaisesti. Kahta muuta tuhkaa käytettiin vain kuitumaisesti.

ICT-kokeet tehtiin sideainepitoisuuksilla 6,1, 6,5 ja 6,9 %. Suuren ominaispinta-alan omaavia tuhkia käytettäessä massojen ulkonäkö ei poikennut perinteisistä massoista. Massat eivät myöskään tiivistyksessä käyttäytyneet poikkeavasti. Alhaisemman ominaispinta-alan tuhkia sisältävät massat olivat sekoitettaessa ulkonäöltään kuivia, mutta tiivistettäessä sideaine vapautui ja massat tiivistyivät erittäin hyvin. ICT-kiertotiivistimen suurempaa (halk. 150 mm) muottikokoa käyttäen massat tiivistyivät selvästi paremmin.

Suuren ominaispinta-alan omaavat tuhkat toimivat pieninä lisäyksinä kuitumaisesti käytettynä, sideainetta sitovana ainesosana. Suurina lisäyksinä, osana hienoainesta suuresta ominaispinta-alasta johtuen niiden käyttö on epätaloudellista, koska sideainemäärä kasvaisi tavanomaista pitoisuutta suuremmaksi. Alhaisen ominaispinta-alan omaavat tuhkat eivät sitoneet sideainetta riittävästi ja pysyvästi, jotta niitä voitaisiin käyttää kuidun korvaajina.

Kokeista saatuja tuloksia on pidettävä erittäin lupaavina. Suuren ominaispinta-alan omaavat puu- ja turvetuhkat voisivat olla vaihtoehtoisia materiaaleja nykyisin päällysteessä käytetyille selluloosakuidulle. Tarvittava ainesmäärä on kuitenkin tuhakohtainen, joten massasta on tehtävä aina toiminnallinen suhteitus.

Key words: Fly ash, filler, fibre, compactibility, asphalt

ABSTRACT

The aim of this preliminary research was to determine the usability of peat and wood ashes in stone mastic asphalt. 13 ashes from both peat power plants (7 ashes) and pulp and wood industry (6 ashes) were included. The specific surface areas (nitrogen adsorption) of these ashes were between 4,0 and 97,3 m²/g and fines contents (< 0,063 mm) between 17 and 92 %.

Four different kind of ashes were chosen to asphalt drain down tests and gyratory compactor tests. In these tests ashes were used as substitute material for fibre and on the other hand as asphalt filler with limestone filler. Water adsorption, ignition loss, dry void content and grain size distribution of these ashes were measured. Asphalt drain down tests indicated that ashes having the highest values of specific surface area, water adsorption and ignition loss had the lowest values of bitumen loss. The other ashes didn't stabilize the binder good enough. The results were similar in asphalt filler tests using ashes together with limestone filler.

According to the results of gyratory compactor test the asphalts (stone mastic asphalt SMA 18) consisting ashes with high values of specific surface area were normally compactable. This was the case when these ashes were used as substitute material for fibre. On the other hand, the use of these ashes might not be economic if they are used as asphalt filler with or without limestone filler. This is due to increased need of binder. Asphalt mixtures were easier compactable with the larger (150 mm diameter) gyratory compactor mold than with the smaller mold (100 mm diameter). Ashes with low values of specific surface area didn't stabilize the binder good enough. As a result these ashes can't substitute the fibre.

Preliminary tests indicated that peat and wood ashes with high specific surface areas could substitute the cellulose fibre used in stone mastic asphalt. The required ash content must always be determined on account of the proportioning based on volume and compaction properties of the mixture.

ALKUSANAT

Suomessa on viime vuosina ryhdytty aktiivisesti selvittämään teollisuuden jätemateriaalien hyötykäyttöä yhdyskuntarakentamisessa. Tämä on johtunut pääosin kiristyvistä ympäristö- ja päästönormeista sekä asutuskeskusten läheisyydessä tapahtuneesta hyvälaatuisten kiviainesten vähenemisestä. Voimalaitosten kivihiilituhkia on käytetty maarakentamisessa jo usean vuosikymmenen ajan, mutta esimerkiksi voimalaitosten turvetuhkille sekä massa- ja paperiteollisuuden puutuhkille ei aina ole löytynyt käyttökelpoista sovellutusta maarakentamisessa.

Tutkimus käsittelee esitutkimusluonteisesti turve- ja puutuhkien käyttöä SMA-päällysteen kuidun korvaajana. Tutkimuksen tilaajana oli tielaitoksen kehittämiskeskus. Tutkimusta valvoi tielaitoksen edustajana tieinsinööri *Mats Reihe*. Tutkimuksen vastuuhenkilönä oli erikoistutkija *Risto Alkio* Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen yhdyskuntatekniikan tutkimusyksiköstä. Raportin ovat laatineet erikoistutkija *Risto Alkio* ja tutkija *Jarmo Vuorinen*.

Helsingissä helmikuussa 1996

Tielaitos

Kehittämiskeskus

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	9
2 TUHKANÄYTTEET	9
3 LABORATORIOKOKKEET	10
3.1 Hienoaineskokeet	10
3.2 Sitoutumiskokeet	11
3.3 Massakokeet	12
4 KOKEIDEN TULOKSET	13
4.1 Tuhkien hienoainesominaisuudet	13
4.2 Massakokeisiin valittujen tuhkien ominaisuudet	15
4.3 Sitoutumiskokeet	17
4.4 Massakokeet	18
5 TULOSTEN TARKASTELU	20
5.1 Tuhkien ominaisuudet	20
5.2 Massaominaisuudet	21
5.2.1 Sitoutumiskokeet	21
5.2.2 Tiivistettävyyys	21
6 YHTEENVETO	25
7 KIRJALLISUUS	27

1 JOHDANTO

1980-luvun lopulla Suomen energiatuotannon polttolaitoksilla syntyi tuhkaa, tuhkalietettä ja kuonaa noin 950 000 tonnia, josta noin 60 % oli lentotuhkaa /1/. Vuonna 1994 massa- ja paperiteollisuuden tuhkia muodostui 350 000 tonnia, josta määrästä noin 40 % oli energian tuotannosta peräisin olevaa puutuhkaa, muita energian tuotannon tuhkia 30 % ja sellun valmistuksen tuhkamaisia jätteitä 30 % /2/.

Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähköön tuotantoon käytetyistä polttoaineista turpeen osuus on Suomessa 1990-luvun alussa ollut noin 20 % ja teollisuuden puujätteen osuus noin 3 % /3/. Metsäteollisuuden energias- ta 40 % saadaan puujätteestä, lähinnä kuorijätteestä ja 3 % turpeesta /2/.

Kivihiilivoimaloiden lentotuhkaa on käytetty jo usean vuosikymmenen ajan menestyksellisesti maarakentamisessa. Viime vuosien aikana sitä on ryhdytty käyttämään myös päällysteen täytejauheena. Turvevoimaloiden tuh- kista ja niiden geoteknisistä ominaisuuksista ja käytöstä maarakentamises- sa on tehty useita selvityksiä, mutta tuhkien käyttö on ollut hyvin rajallista. Eräs käytön este on ollut se, ettei turvetuhkilla yleensä ole kivihiilituhkien tavoin sitoutuvia eli podsolaanisia ominaisuuksia. Turvetuhkia on käytetty lähinnä sementtiteollisuuden tarpeisiin, maanparannusaineena sekä täyte- ja pengermateriaalina. Nykyisin kuitenkin suurin osa niin turvetuhkista kuin massa- ja paperiteollisuuden tuhkista läjitetään kaatopaikalle. Massa- ja paperiteollisuuden puutuhkasta hyötykäytettiin vuonna 1994 viherraken- tamiseen ja metsien lannoitukseen lähes 35 000 tonnia eli noin 25 % /2/.

Tutkimus käsittelee esitutkimusluonteisesti turve- ja puutuhkien käyttöä SMA-päällysteen kuidun korvaajana. Kivimastiksiasfaltin pääosan muodos- taa karkea, lähes tasarakeinen murskattu kiviaines, jonka muodostaman kiviainesrungon tyhjätilan täyttää stabiloitu mastiksi. Päällysteessä käyte- tään jätepaperista jauhettua sellukuitua bitumin sitomiseen ja massan sta- biilisuuden parantamiseen. Tässä esitutkimuksessa turve- ja puutuhkaa kokeiltiin jätekuidun sijasta vastaavaan tarkoitukseen. Tuhkia kokeiltiin myös asfalttimassan täytejauheena tuhka- ja kalkkikivijauheseoksena.

2 TUHKANÄYTTEET

Tutkimukseen hankittiin tuhkanäytteitä niin turvetta polttoaineenaan käyt- tävistä voimalaitoksista kuin massa- ja paperiteollisuuden tuo- tantolaitoksista. Kaikkiaan eri tuhkia hankittiin 13 eri paikkakunnalta. Näistä tuhista 7 oli peräisin pääosin turvetta polttavista kaukolämpölaitoksista ja 6 massa- ja paperiteollisuudesta.

Edellä mainituista kaukolämpölaitoksista kahden polttoaineena oli pelkäs- tään turve. Muissa laitoksissa näytteenoton aikana polttoaineena käytettiin turpeen ohella vaihtelevin määrin mm. puun kuorta, puuhaketta ja sahan- purua. Paperi- ja selluteollisuuden voimalaitoksista kolmessa tuhka oli pel- kästään ns. puutuhkaa (polttoaineena pääosin puun kuorta). Kahdessa

laitoksessa puun kuoren lisäksi polttoaineena oli 10 - 20 % turvetta ja yhdessä polttoaine oli pääosin turvetta.

Kappaleen 4.1 taulukossa 1 esitetään tutkittujen tuhkien alkuperäiset polttoaineet. Taulukkoon on otettu mukaan vain pääpolttoaineet, joten toisinaan niiden ohella vähäisessä määrin poltettavien polttoöljyn ja kivihiilen määrät eivät näy taulukossa.

3 LABORATORIOKOKKEET

3.1 Hienoaineskokeet

Kaikista 13 tuhkasta määritettiin alkuperäisistä, seulomattomista näytteistä kiintotiheys, ominaispinta-ala ja seulan 0,063 mm läpäisyarvo.

Kiintotiheys on määritetty kahdella rinnakkaisnäytteellä menetelmän PANK 2107 mukaisesti. Tätä pyknometrimenetelmällä saatua kiintotiheyttä on käytetty määrittäessä ominaispinta-alaa ja massakokeisiin valittujen tuhkien tyhjätilaa.

Ominaispinta-alalla tarkoitetaan näytteen rakeiden yhteenlaskettua pinta-alaa massayksikköä kohti. Ominaispinta-ala on määritetty Nova 1000 -laitteella typpiadsorptiomenetelmällä (PANK 2401, 3-piste BET). Jokaisesta tuhkasta on tehty yksi ominaispinta-alamääritys. Menetelmässä kuivattuun näytteeseen adsorboidaan nestemäisen typen lämpötilassa (-196 °C) typpikaasua. Adsorboituneen typen määrän avulla lasketaan näytteen pinta-ala olettamalla, että näytteen pinnalla on yhden molekyylin vahvuinen typpikerros.

Hienoaineksen ominaispinta-alalla on vaikutusta mm. asfalttipäällysteen sideainepitoisuuteen ja rakeiden sitoman veden määrään. Asfalttinormien mukaan päällysteessä käytettävän hienoainesseoksen ominaispinta-ala on oltava 1 - 5 m²/g. SMA-päällysteessä käytettävien selluloosakuitujen (kuivattu näyte) suositeltava ominaispinta-ala on puolestaan 2 - 3 m²/g.

Tuhkien alle 0,063 mm:n aineksen määrä on selvitetty pesuseulomalla noin 200 gramman tuhkaerä menetelmän PANK 2102 mukaisella tavalla.

Massakokeisiin valituista neljästä tuhkasta määritettiin edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi alkuperäisen, seulomattoman näytteen vedenadsorptio ja hehkutushäviö sekä alle 0,063 mm:n aineksen ominaispinta-ala, tyhjätila ja rakeisuus.

Hienoaineksen vedenadsorptiolla tarkoitetaan sen 100 % suhteellisessa kosteudessa sitomaa veden määrää. Kokeessa avoimessa astiassa olevaa, kuivapainoltaan tunnettua näytettä (2 rinnakkaisnäytettä) säilytetään 7 vrk:n ajan suljetussa eksikaattorissa, jossa on 100 % suhteellinen kosteus (PANK-2108). Vedenadsorptioluku on näytteeseen adsorboituneen veden määrä prosentteina näytteen kuivapainosta.

Kiviaineksen ja bitumin välisiä tartuntaominaisuuksia kuvaava veden adsorptiokyky neliömetriä kohti määritetään jakamalla vedenadsorptio (mg/g) ominaispinta-alalla (m^2/g). Asfalttinormien mukaan tämän arvon tulisi olla $\leq 10 \text{ mg} / \text{m}^2$. Kivihiilientotuhkilla saadut tulokset osoittavat kuitenkin, ettei kyseinen vaatimus soveltu kaikille materiaaleille /4/.

Hienoaineksen hehkutushäviö on määritetty muhveliuunissa polttamalla menetelmän PANK 2408 mukaisesti. Hehkutushäviö (975°C) on määritetty alkuperäisestä seulomattomasta aineksesta kahdella rinnakkaisnäytteellä.

Hienoaineksen tyhjätila ilmoittaa tilavuusprosentteina näytteen sisältämien huokosten määrän standardikokeessa (PANK 2404). Tyhjätila määritetään vähintään kolmella rinnakkaisnäytteellä ns. Rigden-laitteella. Laitteen sylinteriin sijoitettu noin 10 g kuiva näyte tiivistetään vapaasti putoavan sylinterikappaleen ja männän avulla. Sadan pudotuskerran jälkeen mitataan tiivistetyn materiaalin korkeus. Materiaalin tilavuuden, massan ja kiintotiheyden avulla lasketaan näytteen tyhjätila. Hienoaineksen tyhjätila on tärkeä suhteitusominaisuus ja Asfalttinormien mukaan sen tulisi olla 36 - 44 %. Vaatimus koskee päällysteen runkoaineksen hienoainesosan ja täytejauheen seosta.

Alle 0,063 mm:n aineksen rakeisuus on määritetty areometrillä menetelmän PANK 2103 mukaisesti. Asfalttinormien 1995 mukaan areometri-menetelmällä määritetty hienoaineksen 0,002 mm:n läpäisyarvo tulee olla alle 10 %.

3.2 Sitoutumiskokeet

Sitoutumiskokeet aloitettiin tuhkien osalta määrittäen niiden lisäystaso massassa. Menetelmää sovelletaan esikokeena irtokuitujen alustavan sitoutumiskyvyn määrittämisessä.

Kokeessa punnitaan 3 g kuitua 250 ml dekantterilasiin, johon lisätään sarjana oletettu sideainemäärä (esim. 15, 17, 19 ja 21 g bitumia B80). Massaa sekoitetaan spaattelilla 2 minuuttia 150°C lämpötilassa, minkä jälkeen dekantterilasit laitetaan foliolla peitettynä lämpökaappiin yhdeksi tunniksi 170°C lämpötilaan. Massa kumotaan huokoiselle paperille ja levitetään tasaiseksi kerrokseksi, josta silmämääräisesti tarkastellaan kuitujen peittyneisyyttä ja mahdollista liiallista sideainemäärää (imeytyy paperiin). Sopivan sideainemäärän löydyttyä kokeet toistetaan tarkemmalla sarjalla, jossa sideainepitoisuudet ovat 0,5 g:n välein.

Koesarja tehtiin tutkituilla neljällä tuhalla edellä mainitun menetelmän mukaisesti, joskin punnittava tuhkamäärä oli huomattavasti suurempi kuin jätepaperista jauhetuilla irtokuiduilla käytetty 3 g lisäys.

Alustavan sitoutumiskokeen jälkeen sitoutuvuus tarkistettiin ns. dekkakokeella menetelmän PANK 3101 mukaisesti. Menetelmällä määritetään asfalttimassasta irronneen bitumin määrä eli bitumihävikki sekoituksen ja lämpökäsittelyn jälkeen. Menetelmää sovelletaan normaalisti asfalttimas-

saan sekoitettavan kuidun optimipitoisuuden määrittämiseen. Bitumihävikin määrä on yleensä välillä 0,08 - 0,15 %, kun kuitu on tarpeeksi hyvin bitumia sitovaa. Kuidun korvikkeen lisäksi tuhkia kokeiltiin kokeessa päällysteen täytejauheena (10 %) siten, että puolet oli tutkittavaa tuhkaa ja puolet kalkkikivijauhetta.

3.3 Massakokeet

Koemassana oli SMA 18-massa, jonka kiviaineksena käytettiin Koskenkylän kiveä. Normaalisti massassa on täytejauheena 10 % kalkkikivijauhetta, lisäaineena 0,4 % sellukuitua (Arbocel) ja sideaineena 6,5 % bitumia B-80. Kiviaineksen rakeisuuskäyrä (ns. normaalikäyrä) on esitetty kuvassa 1. Massakokeisiin valittiin neljä erilaista tuhkaa, joista kaksi oli puutuhkaa ja kaksi turvetuhkaa. Ensisijaisena valintakriteerinä oli tuhkien ominaispinta-ala. Kuvassa 1 on esitetty vertailun vuoksi rakeisuudeltaan eniten normaalkäyrästä poikkeavan massan (tuhka 12) rakeisuus. Kaikki tuhkia sisältävien massojen rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 1.

Tuhkien vaikutus massojen suhteitusominaisuuksiin testattiin ICT-kiertotiivistimellä (halkaisija 100 mm), jossa sylinterissä olevaa massaa tiivistetään pyörivässä liikkeessä olevan männän avulla. Kokeen tulos ilmoitetaan leikkausjännityksenä kN/m^2 , joka kuvaa massan muodonmuutoksen vastustuskykyä tiivistyskokeessa. Leikkausjännitykset määritetään normaalisti 102 ja 406 kierroksen jälkeen. Jokaisella tuhkalla koe tehtiin vähintään kolmella eri sideainepitoisuudella ja kolmella rinnakkaisnäytteellä. Lähtösideainepitoisuudet valittiin sitoutumiskokeiden ja aikaisempien kokemusten perusteella. Näytteistä määritettiin massan tiheys, koekappaleen tiheys, tyhjätila, kiviaineksen tyhjätila ja sideaineen täyttöaste. Lisäksi massoja ja koekappaleita arvioitiin silmämääräisesti.

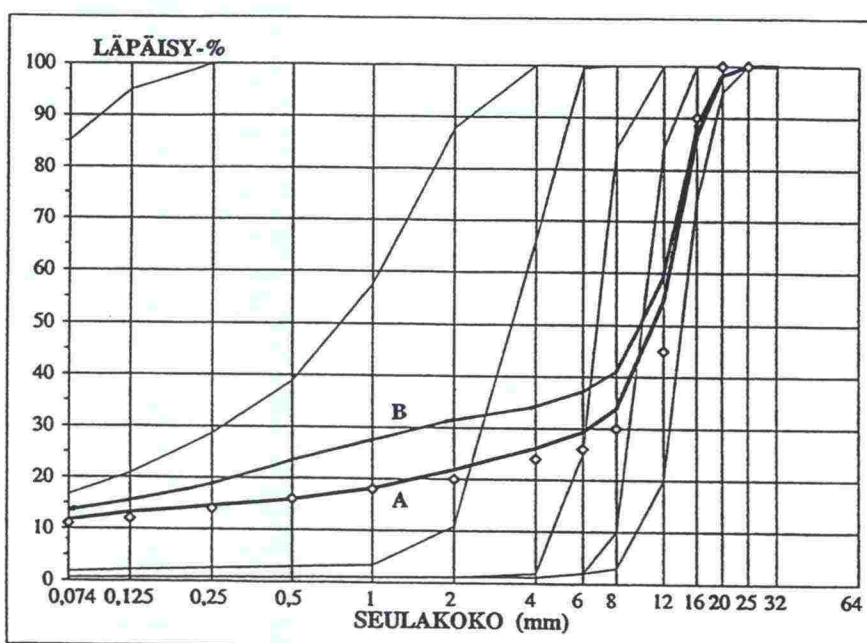
Tyhjätila lasketaan massan ja päällysteen tiheyksistä ja se ilmoittaa ilmahuokosten osuuden prosentteina päällysteen tilavuudesta. Kiviaineksen tyhjätilalla ymmärretään kiviainesrakeiden väleihin jäävän tilan (sideaine + tyhjätila) osuutta prosentteina päällysteen tilavuudesta. Täyttöasteella tarkoitetaan sideaineen täyttämää osuutta prosentteina kiviaineksen tyhjätilasta.

Tuhkien vaikutusta massojen ominaisuuksiin testattiin muutamilla massoilla myös suuremmalla ICT-kiertotiivistimellä (halkaisija 150 mm).

4 KOKKEIDEN TULOKSET

4.1 Tuhkien hienoainesominaisuudet

Kaikkien 13 tuhkan kiintotiheys-, ominaispinta-ala- ja 0,063 mm:n seulan läpäisyarvot esitetään taulukossa 1. Koska tuhkien koostumus ja ominaisuudet voivat vaihdella suurestikin esim. vuodenajan ja käytetyn polttoaineseoksen mukaan, taulukon 1 arvot edustavat vain kyseistä näyte-erää. Taulukossa on esitetty myös eri tuhkien senhetkinen laatu alkuperäisen polttoaineen suhteen.

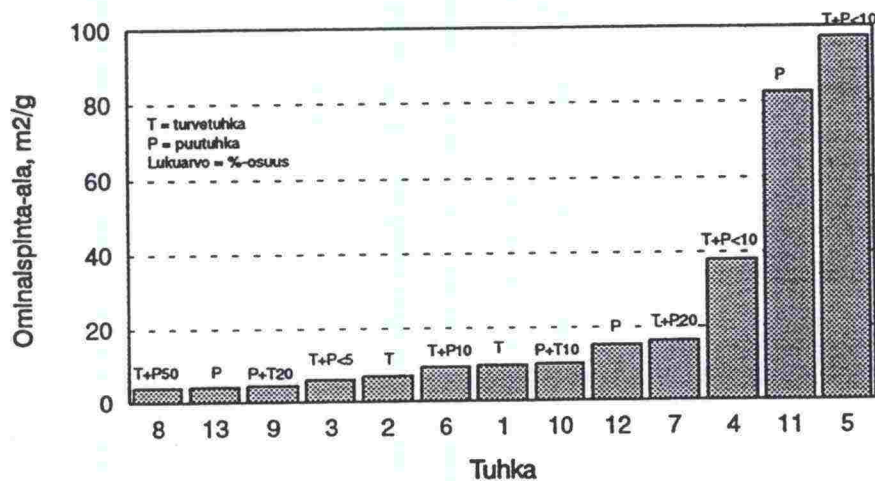


Kuva 1. SMA 18-massan normaalisti käytetty rakeisuuskäyrä (A) ja vertailuna tuhkaa 12 sisältävän massan rakeisuuskäyrä (B).

Seulomattomien tuhkien ominaispinta-alat vaihtelivat välillä 4,0 - 97,3 m²/g keskiarvon ollessa 23,4 m²/g (kuva 2). Suurimmat arvot saatiin tuhilla 5, 11 ja 4, jotka valittiin tuhkan 12 ohella jatkokokeisiin. Tuhkien hienoainespiitoisuudet (alle 0,063 mm materiaali) vaihtelivat välillä 17 - 92 %. Vain neljän tuhkan läpäisyprosentit olivat yli 80.

Taulukko 1. Alkuperäisten tuhkanäytteiden perusominaisuudet (tv = polttoaineena pääosin turve ja puu = polttoaineena pääosin puun kuori).

Tuhka n:ro	Tuhkan laatu	Kiinto- tiheys g/cm ³	Ominais- pinta-ala m ² /g	Seulan 0,063 mm läpäisy-%
1	tv	2,96	9,7	64
2	tv	3,13	7,0	84
3	tv+puu<5%	2,82	6,1	88
4	tv+puu<10%	2,72	37,9	84
5	tv+puu<10%	2,39	97,3	68
6	tv+puu10%	2,57	9,4	50
7	tv+puu20%	2,78	16,2	54
8	tv+puu50%	2,94	4,0	92
9	puu+tv20%	2,37	4,5	59
10	puu+tv10%	2,67	10,1	20
11	puu	2,46	82,4	37
12	puu	2,62	15,1	17
13	puu	2,74	4,2	68



Kuva 2. Tuhkien ominaispinta-alat (alkuperäinen näyte).

4.2 Massakokeisiin valittujen tuhkien ominaisuudet

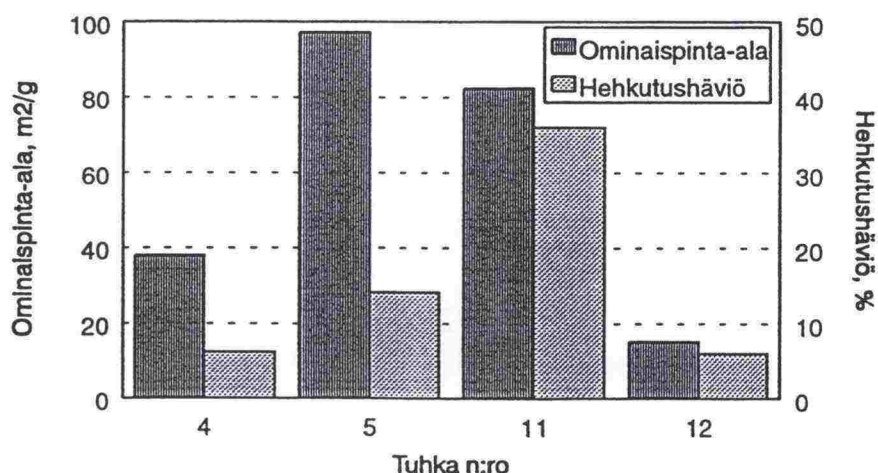
Massakokeisiin valittiin lähinnä ominaispinta-alojen perusteella neljä tuhkaa eli tuhkat 4, 5, 11 ja 12. Näistä tuhkat 4 ja 5 ovat turvetuhkia ja tuhkat 11 ja 12 puutuhkia.

Alkuperäisistä, seulomattomista tuhista määritettiin niiden vedenadsorptio ja hehkutushäviö sekä alle 0,063 mm:n aineksesta ominaispinta-ala ja tyhjättila. Nämä arvot, kuten jo aiemmin esitetyt alkuperäisen näytteen ominaispinta-alat ja seulan 0,063 mm läpäisyarvot, esitetään taulukossa 2. Taulukossa on myös vedenadsorption ja ominaispinta-alan suhteena laskettu vedenadsorptiokyky (mg/m^2).

Tutkitun neljän tuhkan ominaispinta-alat vaihtelivat välillä 15,1 - 97,3 m^2/g (kuva 3) ja alle 0,063 mm:n aineksen ominaispinta-alat välillä 14,5 - 86,9 m^2/g . Vedenadsorptiot olivat 4,1 - 17,3 % ja 0,9 - 6,0 mg/m^2 . Hehkutushäviöt olivat 6,1 - 35,9 % (kuva 3), tyhjättilat 54,5 - 65,4 % ja seulan 0,063 mm läpäisyarvot 14 - 84 %.

Taulukko 2. Massakokeisiin valittujen tuhkien ominaisuuksia.

Tuhka n:ro	Omin.p-a alkup. m^2/g	Omin.p-a seul. m^2/g	Veden-ads. %	Vedenads. kyky mg/m^2	Hehk. häviö %	Tyhjättila %	Seulan 0,063 mm läp.-%
4	37,9	14,5	4,1	1,1	6,1	54,5	84
5	97,3	86,9	9,2	0,9	14,1	62,5	68
11	82,4	21,6	17,3	2,1	35,9	65,4	37
12	15,1	24,7	9,0	6,0	5,9	62,5	14



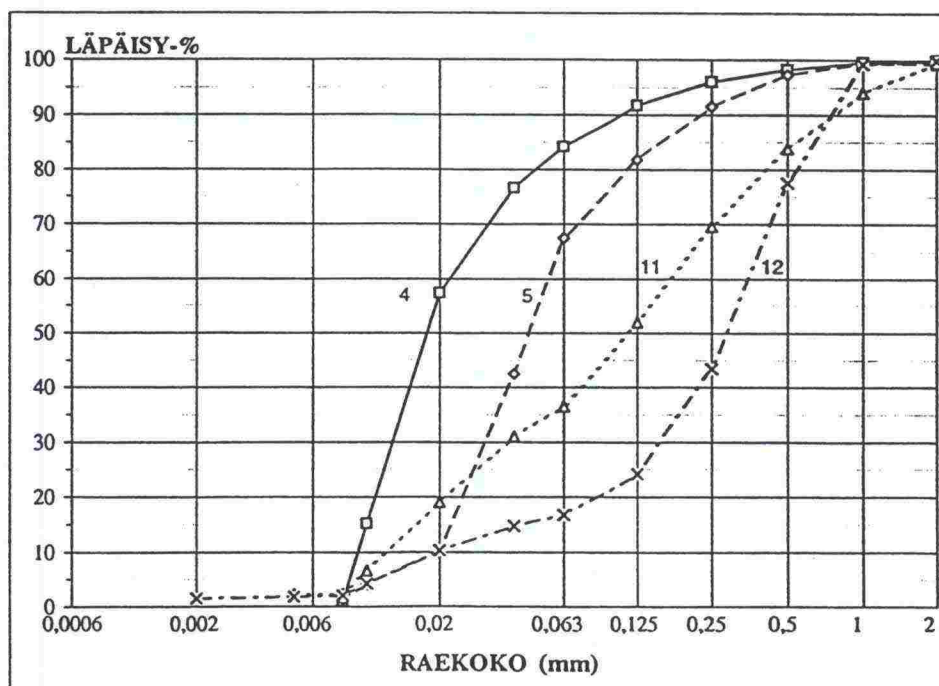
Kuva 3. Massakokeisiin valittujen tuhkien alkuperäisistä näytteistä määritetyt ominaispinta-alat ja hehkutushäviöt.

Tuhkasta 5 oli käytettävissä runsaasti laadunvalvontanäytteitä, joista viidestä määritettiin ominaispinta-ala. Ominaispinta-alat ja voimalaitoksen itse määrittämät hehkutushäviöt esitetään taulukossa 3. Seitsemän kuukauden ajanjakson aikana tuhkan hehkutushäviöt (yli 40 määritystä) vaihtelivat 4,6 %:sta 30,9 %:in ja ominaispinta-alat (5 määritystä) 34,6 m²/g:sta 188,4 m²/g:an.

Taulukko 3. Tuhkan 5 ominaispinta-alat ja hehkutushäviöt.

Tuhkanäyte/pvm	Ominaispinta-ala m ² /g	Hehkutushäviö %
26.10.94	105,8	18,0
4.11.94	127,5	24,5
9.11.94	188,4	30,9
28.4.95	107,4	11,5
1.5.95	34,6	4,6

Tuhkista pesuseulonnan ja areometrikokeen avulla saadut rakeisuuskäyrät esitetään kuvassa 4. Rakeisuudeltaan tuhka 4 oli hienoin ja tuhka 12 karkein. Rakeisuuskäyrän muoto oli toisaalta tuhkillä 4 ja 5 sekä toisaalta tuhkillä 11 ja 12 samankaltainen. Esimerkiksi alle 0,02 mm:n aineksen määrät vaihtelivat tuhkillä välillä 10,2 - 57,3 %. Alle 0,006 mm:n ainesta oli areometrikokeen perusteella vain tuhkillä 12, joka oli tuhkista karkearakeisin.



Kuva 4. Massakokeisiin valittujen tuhkien (tuhkat 4, 5, 11 ja 12) rakeisuuskäyrät.

4.3 Sitoutumiskokeet

Alustavan sitoutumiskokeen perusteella saatiin taulukossa 4 esitetyt tulokset. 12 g tuhkaa sitoi tuhkan laadusta riippuen 5 - 15 g sideainetta. Vertailun vuoksi mainittakoon, että 3 g Arbocel-kuitua sitoo noin 17 g sideainetta. Tilavuussuhteiksi muutettuna 30 ml tuhkaa, joka vastaa tuhkalaadusta riippuen 11,5 - 27,0 g tuhkaa, sitoi 12 - 16 g sideainetta. 30 ml eli 31,3 g kalkkikivijauhetta sitoi puolestaan 7 g bitumia.

Taulukko 4. Alustavan sitoutumiskokeen tulokset (tuhkan bitumia sitova vaikutus).

Tuhka n:ro	12 g tuhkaa sitoi sideainetta, g	30 ml tuhkaa	
		Sitoi sideainetta, g	Tuhkan määrä, g
4	12	12	12,3
5	10	16	20,7
11	15	14	11,5
12	5	13	27,0

Alustavan sitoutumiskokeen jälkeen tehtiin tuhkista PANK-menetelmän 3101 mukainen sitoutumiskoe massassa käyttäen karkeana kiviaineksena Koskenkylän vulkaniittia. Tuhkalla 11 kokeet tehtiin tuhkapitoisuuksilla 1,8, 2,7 ja 3,6 %. Näistä 3,6 % osoittautui sopivaksi määräksi, vaikka massa tuntuikin sekoitettaessa kuivahkolta. Tällä tuhkamäärällä bitumihävikiksi saatiin 0,09 % eli sitoutuminen oli riittävä.

Tuhkalla 4 dekkakokeet tehtiin viidellä eri tuhkapitoisuudella, jotka vaihtelivat välillä 2,3 - 5,8 %. Optimimäärällä 4,7 % tuhka oli sekoitettaessa hyvin kuivaa, mutta vettyi lämpösäilytyksessä sideaineen irrotessa ylimäärin. Tuhka siis sitoi sideainetta huonosti.

Tuhkalla 5 tuhkapitoisuuksina olivat 3,6 ja 5,5 %, joista viimeksi mainitulla saatiin hyväksyttävä bitumihävikki eli 0,10 %. Sen sijaan tuhkalla 12, jolla pitoisuuksina olivat 8,0 ja 10,0 %, ei saatu kuin kohtalainen sitoutuminen (bitumihävikki 0,14 %). Tuhkan 4 tavoin massa oli sekoitettaessa kuivaa, mutta vettyi lämpösäilytyksessä.

Tulokset olivat edellä mainitun kaltaisia myös täytejauhekokeessa, jossa täytejauheena (10 %) oli tuhkan ja kalkkikivijauheen seos (1 : 1) ja sideainepitoisuus 6,5 %. Tuhkalla 11 saatiin bitumihävikiksi 0,06, mutta tuhkalla 4 massa jäi hyvin vettyneeksi. Tuhkalla 5 bitumihävikiksi saatiin 0,07 käyttämällä sideainepitoisuutta 5,5 %. Tuhkalla 12 ei tehty tätä täytejauhekoetta, koska se toimi sitoutumiskokeessa yksinään niin huonosti.

4.4 Massakokeet

Massakokeisiin valittiin tuhkien hienoainesominaisuuksien perusteella kaksi turvetuhkaa ja kaksi puutuhkaa. Valintaperusteena tuhkillä oli ensisijaisesti ominaispinta-ala. Turvetuhkia olivat tuhkat 4 ja 5 sekä puutuhkia tuhkat 11 ja 12.

Tuhkien vaikutus tiivistettävyyteen testattiin ICT-kiertotiivistimellä kolmella eri sideainepitoisuudella. Sekä tuhka- että sideainepitoisuudet hienoaines-seoksissa valittiin sitoutumiskokeiden perusteella. Kokeissa suuren ominaispinta-alan omaavia tuhkia 5 ja 11 käytettiin sekä pelkästään kuidun korvaajana että kuidun korvaajana ja täytejauheena samanaikaisesti. Tuhkia 4 ja 11 käytettiin niiden huonojen sitoutumistulosten vuoksi vain kuitumaisesti.

Sitoutumiskokeiden perusteella tuhkia käytettiin kuitumaisesti siten, että tuhkaa 5 lisättiin massaan 5,5 % kiviaineksen painosta. Vastaavasti tuhkaa 11 lisättiin massaan 3,6 %, tuhkaa 4 lisättiin 5,2 % ja tuhkaa 12 lisättiin 10 %. Kalkkikivijauhetta oli kaikissa seoksissa täytejauheena 10 % kiviaineksen painosta.

Korvattaessa tuhkalla osa kalkkikivijauheesta tuhkaa 5 käytettiin 8 % ja tuhkaa 11 käytettiin 5 % kiviaineksen määrästä. Kalkkikivijauhetta oli molemmissa seoksissa 5 % kiviaineksen määrästä. Tuhkamäärät arvioitiin sitoutumiskokeiden perusteella ja tavanomaisista kuiduista ko. kokeella saatujen tulosten perusteella. Sitoutumiskokeen soveltuvuudesta tuhkille sellaisenaan ei ole vielä riittävästi tuloksia, joten tuhkien optimipitoisuuden määrittäminen tulisi tehdä useilla tuhka- ja hienoainespitoisuuksilla, mihin tässä tutkimuksessa ei ollut mahdollisuuksia. Kaikkiin ICT-kokeisiin valittiin sideainepitoisuuksiksi 6,1, 6,5 ja 6,9 prosenttia.

ICT-kokeiden leikkausvoimat ja tiheydet esitetään tiivistystyön funktiona liitteissä 2 - 7. Tiivistetyistä koekappaleista määritettiin tiheydet teoreettisesti ja kokeellisesti koekappaleen vesi-, ilma- ja pintakuivapunnituksin. Näytteistä määritettiin laskennallisesti täyttöaste, tyhjätila ja kiviaineksen tyhjätila. Tulokset on esitetty liitteessä 8 lukuarvoina sekä kuvina, joista selviää keskiarvokäyrän lisäksi myös kolmen rinnakkaisnäytteen yksittäistulokset.

Leikkausvoimat 102 tiivistyskierroksen jälkeen tuhkalla 11 olivat huomioiden eri sideainepitoisuudet ja hienoainesseossuhteet yksittäisinä arvoina välillä 68 - 90 kN/m² ja 406 tiivistyskierroksen jälkeen välillä 59 - 81 kN/m². Vastaavasti tuhkalla 5 arvot olivat välillä 59 - 87 kN/m² ja 52 - 84 kN/m². Tuhkalla 4 arvot olivat välillä 71 - 84 kN/m² ja 59 - 78 kN/m² sekä tuhkalla 12 välillä 65 - 95 kN/m² ja 56 - 81 kN/m².

Tiheydet kasvoivat käytetyillä sideainepitoisuuksilla sideainepitoisuuden lisääntyessä. Mitatut lopputiheydet olivat yksittäisarvoina tuhkalla 5 välillä 2190 - 2350 kg/m³ ja tuhkalla 11 välillä 2110 - 2280 kg/m³. Tuhkilla 4 ja 12 vastaavat arvot olivat välillä 2180 - 2320 kg/m³ ja 2360 - 2380 kg/m³.

Taulukossa 5 on esitetty massojen tyhjätilat, kiviaineksen tyhjätilat ja täyttöasteet rinnakkaisnäytteiden keskiarvoina.

Taulukko 5. Massojen tyhjätilat (TT), kiviaineksen tyhjätilat (KAT) ja täyttöasteet (TA) rinnakkaisnäytteiden keskiarvoina (SA = sideaine, KF = kalkkikivijauhe).

Ominaisuus %	Tuhka 4 lisäys 5,2 %			Tuhka 5 lisäys 5,5 %			Tuhka 5 KF 5 % / tuhka 8 %		
	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA
	6,1	6,5	6,9	6,1	6,5	6,9	6,1	6,5	% 6,9
TT	3,8	3,0	2,7	3,1	2,4	1,8	4,3	3,1	2,6
KAT	18,0	18,3	18,8	17,4	17,6	17,9	18,4	18,2	18,5
TA	79,1	83,3	85,6	82,0	86,5	90,0	76,5	82,8	86,2

Ominaisuus %	Tuhka 11 lisäys 3,6 %			Tuhka 11 KF 5 % / tuhka 5 %			Tuhka 12 lisäys 10 %		
	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%	SA%
	6,1	6,5	6,9	6,1	6,5	6,9	6,1	6,5	6,9
TT	4,6	3,9	2,8	6,2	5,5	4,5	1,8	1,1	1,0
KAT	18,7	19,0	18,9	20,0	20,3	20,3	16,3	16,6	17,3
TA	75,5	79,3	85,1	69,1	72,8	77,7	89,1	93,1	94,3

Tyhjätila lasketaan massan ja päällysteen tiheyksistä ja se ilmoittaa ilmahuokosten osuuden prosentteina päällysteen tilavuudesta. Tyhjätila-arvot tuhilla 5 ja 11 vaihtelivat sideainepitoisuudesta riippuen välillä 1,3 - 4,7 % ja 2,2 - 6,5 %. Tuhilla 4 ja 12 arvot olivat välillä 2,4 - 3,8 % ja 1,0 - 1,9 %.

Kiviaineksen tyhjätilalla ymmärretään kiviainesrakeiden väleihin jäävän tilan (sideaine + tyhjätila) osuutta prosentteina päällysteen tilavuudesta. Tyhjätilat (yksittäisarvojen keskiarvot) olivat massoilla välillä 16,3 - 20,3 %.

Täyttöaste, joka ilmoittaa sideaineen täyttämän osuuden prosentteina kiviaineksen tyhjätilasta, kasvoi luonnollisesti sideainepitoisuuden lisääntyessä. Sideainetarve oli hyvin riippuvainen tuhkan ominaisuuksista. Täyttöaste vaihteli tuhilla 5 käytettyjen tuhaseosten yksittäisnäytteillä välillä 74,9 - 92,6 % ja tuhilla 11 välillä 68,1 - 87,9 %. Vastaavasti tuhilla 4 ja 12 arvot olivat välillä 78,9 - 87,1 % ja 88,4 - 94,4 %.

Massakokeet tehtiin tuhkien 5 ja 11 muutamilla sideainepitoisuuksilla myös ICT-kiertotiivistimen suuremmalla, halkaisijaltaan 150 mm:n muotilla. Massat tiivistyivät selvästi paremmin isoa muottikokoa käyttäen. Molemmissa muoteissa pintapaine oli 160 kPa ja kiertojen määrä sama. Kokeen tulokset on esitetty käyrinä tiivistyskertojen funktiona liitteessä 9 ja lukuarvoina liitteessä 10.

Tiivistyskokeiden yhteydessä massojen ominaisuuksia tarkasteltiin myös silmämääräisesti. Tuhkia 5 ja 11 käytettäessä massojen ulkonäkö ei poikennut perinteisistä massoista. Massat eivät myöskään tiivistyksessä käyttäytyneet poikkeavasti. Tuhkilla 4 ja 12 massat olivat sekoitettaessa ulkonäöltään kuivia, mutta tiivistettäessä sideaine vapautui ja massat tiivistyivät erittäin hyvin.

5 TULOSTEN TARKASTELU

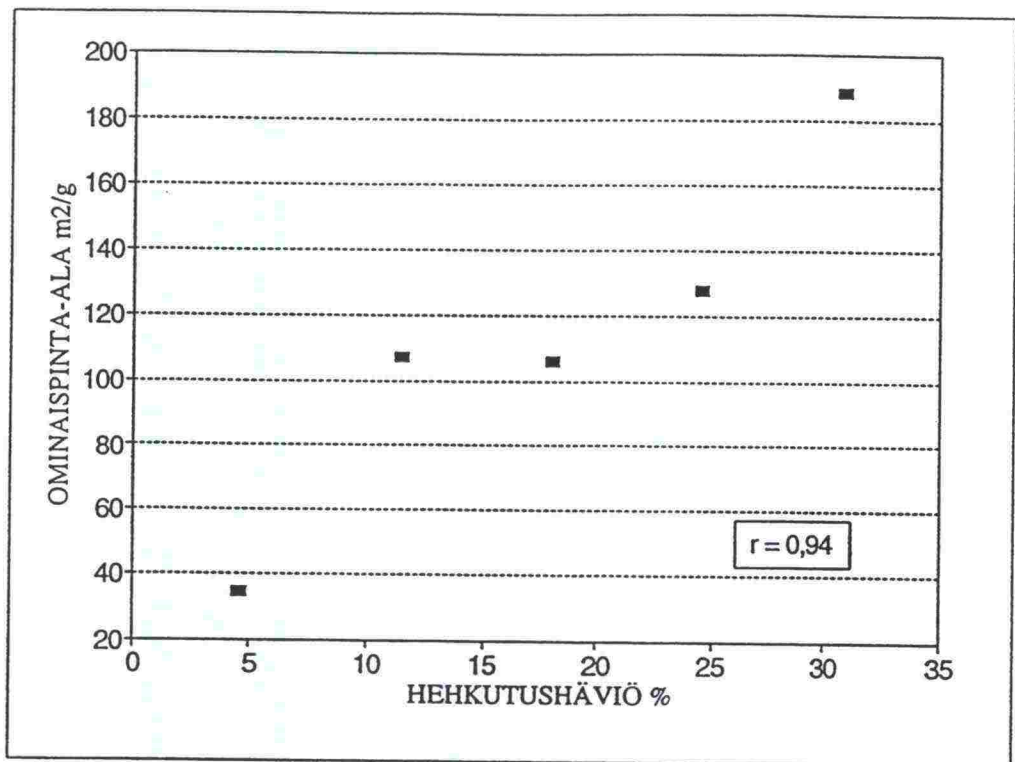
5.1 Tuhkien ominaisuudet

Tuhkien ominaispinta-alat eivät olleet riippuvaisia tuhkan alkuperästä. Niin eri turve- kuin eri puutuhkillakin ominaispinta-alat vaihtelivat suuresti, turvetuhkilla (tuhkat 1 - 7) $6,1 \text{ m}^2/\text{g}$:sta $97,3 \text{ m}^2/\text{g}$:aan ja puutuhkilla (tuhkat 9 - 13) $4,2 \text{ m}^2/\text{g}$:sta $82,4 \text{ m}^2/\text{g}$:aan. Keskiarvot olivat vastaavasti $26,2 \text{ m}^2/\text{g}$ ja $23,3 \text{ m}^2/\text{g}$. Verrattaessa tuhkien ominaispinta-aloja muihin materiaaleihin voidaan todeta, että tavanomaisen, hyvälaatuisen kalliomurskeen $< 0,063 \text{ mm}$:n materiaalin ominaispinta-ala on yleensä $1 - 3 \text{ m}^2/\text{g}$ ja kivihiili-pohjaisilla lentotuhkilla tavallisesti $1 - 10 \text{ m}^2/\text{g}$.

Seulan $0,063 \text{ mm}$ läpäisyn perusteella tutkitut turvetuhkat olivat keskimäärin selvästi hienorakeisempia kuin puutuhkat. Turvetuhkien läpäisyprosentit olivat $50 - 88$ (keskiarvo 70%), kun taas puutuhkien läpäisyprosentit olivat $17 - 68$ (keskiarvo 40%).

Massakokeisiin valitun neljän tuhkan perusteella hienoaineksesta (alle $0,063 \text{ mm}$) määritetty ominaispinta-ala ei anna oikeaa kuvaa koko materiaalin ominaispinta-alasta. Kivihiilituhkista poiketen kolmen tuhkan alkupe-
räisen, seulomattoman näytteen ominaispinta-ala oli suurempi kuin hieno-
aineksen ominaispinta-ala. Vain tuhalla 12 hienoaineksen ominaispinta-
ala oli suurempi kuin alkuperäisellä näytteellä. Areometrikokeen perusteella
tämä tuhka, joka yli $0,063 \text{ mm}$ aineksen osalta oli karkearakeisin, oli myös
ainoa, joka sisälsi alle $0,006 \text{ mm}$:n ainesta. Varsinkin tuhilla 4 ja 11 alku-
peräisen näytteen ominaispinta-ala-arvot olivat useita kymmeniä yksikköjä
(m^2/g) suurempia kuin hienoainenäytteen arvot. Suurimmat ominaispinta-
alat (alkuperäinen näyte) omaavilla tuhilla 5 ja 11 oli myös suurimmat ve-
denadsorptio- ja hehkutushäviöarvot.

Tuhkan 5 eri ajanjaksoina otettujen näytteiden ominaispinta-alat ja hehku-
tushäviöt korreloivat hyvin keskenään (kuva 5). Ilmiö on yhteinen kivihiili-
pohjaisten lentotuhkien kanssa /4/. Polttoteknisistä seikoista sekä poltetun
turpeen laadusta johtuvat ominaispinta-ala- ja hehkutushäviövaihtelut olivat
hyvin suuret. Viiden näytteen ominaispinta-alat vaihtelivat välillä $34,6 -$
 $188,4 \text{ m}^2/\text{g}$ ja yli 40 :n näytteen hehkutushäviöt välillä $4,6 - 30,9 \%$. Tulosten
perusteella tuhkan hyötykäyttö edellyttää tehokasta laadunvalvontaa.



Kuva 5. Tuhkan 5 eri ajanjaksoina otettujen näytteiden ominaispinta-alan ja hehkutushäviön välinen riippuvuus.

5.2 Massaominaisuudet

5.2.1 Sitoutumiskokeet

Sitoutumiskokeiden perusteella tuhkien käyttökelpoisuusjärjestykseksi saatiin tässä alustavassa testissä parhaimmasta huonoimpaan: tuhka 11, 5, 4 ja 12. Tuhka 11 vaikutti toimivan hyvin massan seassa ja tuhka 5 tyydyttävästi, vaikkakin viimeksi mainittua jouduttiin lisäämään massaan melko paljon. Tuhkat 4 ja 12 eivät toimineet sitovasti massassa.

Vertaamalla sitoutumiskokeissa parhaiten menestyneiden tuhkien 11 ja 5 ominaisuuksia huonosti menestyneisiin tuhkiin 4 ja 12 havaitaan, että ensin mainittujen tuhkien ominaispinta-alat (alkuperäinen näyte), vedenadsorptiot ja hehkutushäviöt ovat selvästi suurempia kuin viimeksi mainittujen tuhkien.

Vaikka tuhkia käytettiin massassa kuidun korvikkeena, näiden kahden erityyppisen materiaalin käyttöä massassa tulisi käsitellä erikseen. Tuhkat ja kuidut eivät ole suoraan verrannollisia keskenään, joten tuhkien tarkat määrät massassa tulisi selvittää erikseen tarkemmin.

5.2.2 Tiivistettävyyden

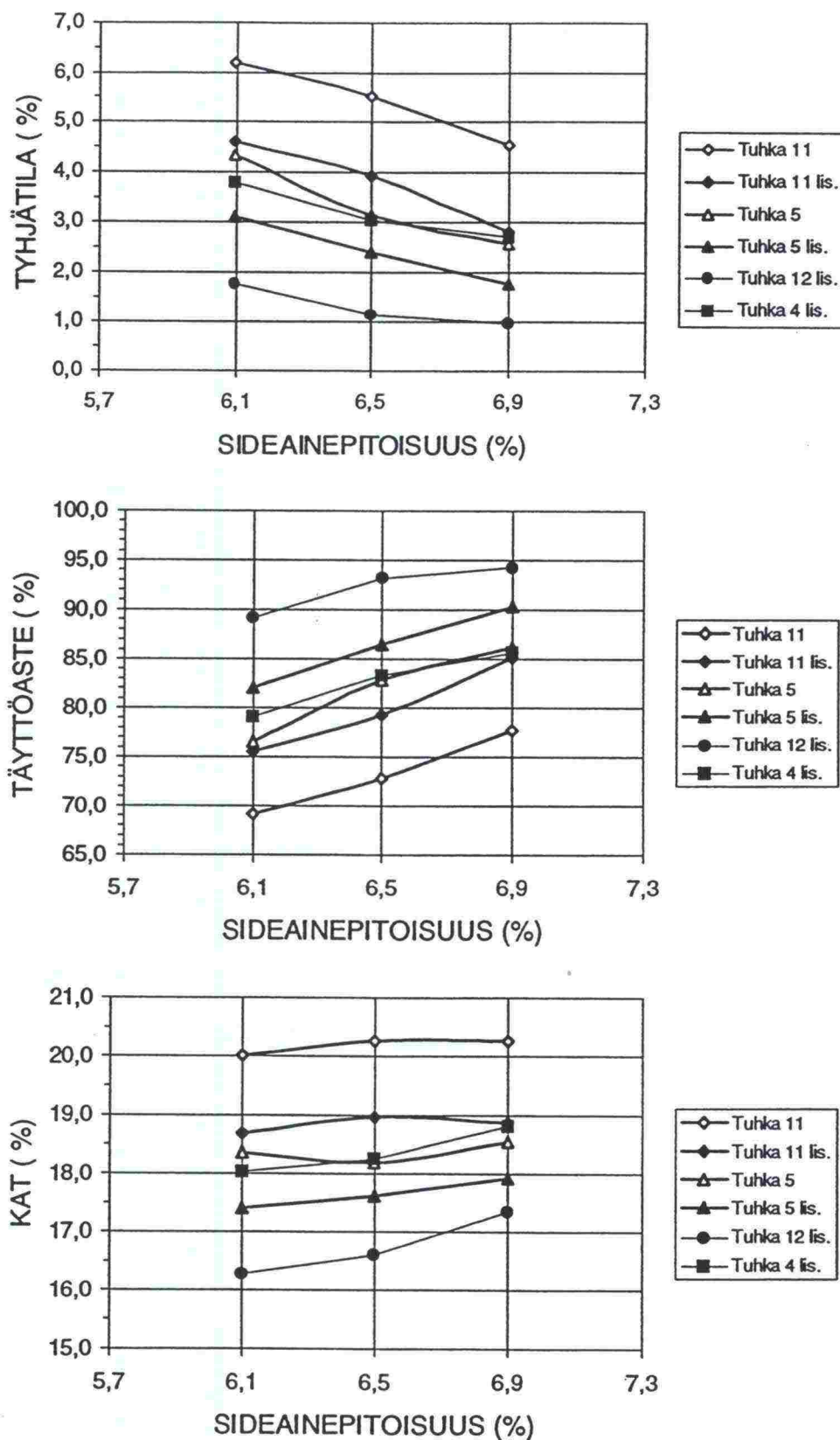
Tuhkien vaikutukset massaominaisuuksiin testattiin kolmella eri sideainepitoisuudella ICT-kiertotiivistimellä (100 mm halkaisija). Tuhkamäärät valittiin sitoutumiskokeiden perusteella. SMA-massalla suhteituksessa pyritään sellaiseen massaan, jossa täyttöaste on noin 85 % ja jossa kiviaineksen tyhjätila olisi tyhjätilakäyrän vaakasuoralla osuudella ja lukuarvoltaan 16 - 20 %. Arvostelukriteerinä on lisäksi tyhjätila, jonka tulisi olla arvojen 2 - 4 % välillä. Vertailuarvoina ovat tavanomaisesta SMA 18-massasta saatavat arvot. Sideainepitoisuus on vertailumassalla ollut 6,5 %.

Kuvassa 6 on esitetty massojen tyhjätilat, kiviaineksen tyhjätilat sekä täyttöasteet käytettyjen hienoinesten ja -seosten sekä sideainepitoisuuden suhteen. Tulokset ovat rinnakkaisnäytteiden keskiarvoja. Yksittäistulokset ovat liitteissä 8.

Tuhkia keskenään arvioitaessa tai verrattaessa tavanomaiseen massatyyppiin on huomioitava, että tuhille ei tässä esitutkimuksessa etsitty optimipitoisuutta kuidun korvaajana eikä oikeaa suhdetta ja määrää hienoineksena. Tulokset koskevat käytettyjä tuhkapitoisuuksia, jotka karkealla tasolla antavat kuvan ko. tuhkan ominaisuuksista ja käyttömahdollisuuksista sekä idean toimivuudesta.

Tuhilla 5 ja 11 massojen ulkonäkö ja käsiteltävyys eivät oleellisesti poikenneet samanlaisista tavanomaisista massoista. Tuhkaa 5 kuitumaisesti käytettynä (5,5 %) 85%:n täyttöaste saavutettiin 6,3 %:n sideainepitoisuudella, mikä on 0,2 prosenttiyksikköä pienempi kuin normaalimassalla. Tuhkamäärän kasvaessa ja sitä käytettäessä tavallaan myös osana hienoinesta jouduttiin sideainemäärää lisäämään riittävään tiiveyteen pääsemiseksi. Vaadittu sideainepitoisuus oli 6,7 %. Tuhka toimii pieninä lisäyksinä kuitumaisesti käytettynä, sideainetta sitovana ainesosana. Suurina lisäyksinä, osana hienoinesta suuresta ominaispinta-alasta johtuen sen käyttö on epätaloudellista, koska sideainemäärä kasvaisi tavanomaista pitoisuutta suuremmaksi.

Tuhkaa 11 käytettäessä massan tiivistyminen oli huonoa käytetyillä sideainemäärillä, koska tuhka sitoi sideainetta hyvin ja enemmän kuin sitoutumiskokeet antoivat olettaa. Ainoastaan tuhkaa kuidunomaisesti (3,6 %) käytettynä sideainepitoisuudella 6,9 % saavutettiin riittävä täyttöaste. Täyttöasteen ollessa riittävä myös tyhjätilat ja kiviaineksen tyhjätilat olivat vaadittavalla alueella. Näin oli myös tuhalla 5. Toisella seoksella (kf 5 % ja tuhkaa 5 %) parhaimmillaankin täyttöaste jäi alle 80 %:n. Tuhkan 11 käytetty tuhkamäärä olisi vaatinut suuremman sideainemäärän, jotta täyttöaste olisi saatu riittäväksi. Tuhka toimii kuidun korvaajana pieninä määrinä käytettäessä. Hienoineksena käytettäessä sideainetarve kasvaisi epätaloudelliseksi.



Kuva 6. Massojen tyhjätilat, kiviaineksen tyhjätilat sekä täyttöasteet käytettyjen hienoinesten ja hienoinesseosten sekä sideainepitoisuuden suhteen.

Tuhkien 4 ja 12 käyttäytyminen poikkesi täysin edellisten tuhkien ominaisuuksista. Massat olivat sekoitettaessa kuivia ja vaikuttivat sideaineköyhiltä, mikä olisi viitannut kykyyn sitoa sideainetta runsaasti. Kuitenkin tiivistettäessä sideainetta vapautui ja massat tiivistyivät erittäin hyvin ja niiden ulkonäkö oli normaali. Tuhkalla 4 vaadittuun 85 %:n täyttöasteeseen päästiin 6,7 %:n sideainemäärällä ja tuhkalla 12 alhaisimmalla käytetyllä sideainemäärällä 6,1 % täyttöasteeksi saatiin 89,1 %. Tuhkat tuntuivat toimivan eräänlaisena "laakerimateriaalina" tiivistyksessä. Massat ilmeisesti vaativat pitkähkön sekoitusajan, jotta tuhkan pintarakenteeseen sitoutunut sideaine irtoaisi tässä vaiheessa eikä massan kuivuudesta johtuva jäykkyys vaikeuttaisi sen työstettävyyttä. Nämä alhaisen ominaispinta-alan omaavat tuhkat eivät sitoneet sideainetta riittävästi ja pysyvästi, jotta niitä voitaisiin käyttää kuidun korvaajina. Sen sijaan tuhkia voidaan ajatella käytettäväksi hienoaineksena ja/tai työstettävyyttä parantavana ainesosana.

ICT-kiertotiivistimen suurempaa (150 mm halkaisija) muottikokoa käyttäen massat (tuhkat 5 ja 11) tiivistyivät selvästi paremmin. Tulosten mukaan (liite 10) täyttöaste kasvoi noin 5 - 8 prosenttiyksikköä käytetyillä massoilla pienempään muottikokoon (100 mm) verrattuna. Sideainepitoisuuksia verrattaessa suuremmalla muottikoolla päästiin noin 0,5 - 0,8 prosenttiyksikköä alhaisemmilla sideainepitoisuuksilla samaan täyttöasteeseen kuin pienempää muottikokoa käyttäen. Luonnollisesti myös tyhjätilat ja kiviaineksen tyhjätilat pienenevät tiiviyn kasvaessa. Tiivistystyön aikana mitatut leikkausvoimat olivat pienemmät suurempaa muottikokoa käytettäessä. Maksimivoimat sekä loppuvoimat olivat noin 10 - 20 kN/m² alhaisemmat isolla muottikoolla. Karkearakeisia massoja tutkittaessa tulisi tiivistystyössä käyttää halkaisijaltaan 150 mm:n muottikokoa. Myös vertailtavuus kentällä saavutettaviin tuloksiin olisi ilmeisesti parempi suurempaa muottikokoa käyttäen.

Tarkasteltaessa tuhkien ominaisuuksia ja niiden vaikutusta tiivistettävyyteen ei ole suoraan löydettävissä yksittäisiä syitä. Tuhkien polttoaineen alkuperä ei myöskään selitä niiden toiminnallisia vaikutuksia. Ainoastaan suuren ominaispinta-alan ja hehikutushäviön omaavat tuhkat sitoivat sideainetta sitoutumiskokeessa enemmän. Massassa ne käyttäytyivät sideainetta sitovasti, mutta niiden suhteellista vaikutusta massaominaisuuksiin ei voida suoraan ennustaa ominaispinta-alan suuruuden mukaan.

Tuloksia tarkasteltaessa on myös huomioitava, että tutkittujen massojen rakeisuudet poikkesivat tuhkien erilaisten rakeisuuksien ja lisätyn tuhkamäärän vuoksi jonkin verran toisistaan (liite 1). Lisätty tuhkamäärä määräytyi sitoutumiskokeiden perusteella. Tuhkaa sisältävät massat sisälsivät esimerkiksi alle 0,074 mm:n ainesta 1,1 - 4,2 prosenttiyksikköä enemmän verrattuna normaalisti käytettyyn SMA 18-massaan. Yhden massan (5 % tuhkaa 11 + 5 % kalkkikivijauhetta) seulan 0,074 mm läpäisyarvo oli 2,4 prosenttiyksikköä peruskäyrää pienempi. Täten maksimissaan 0,074 mm:n läpäisyarvojen ero oli 6,6 prosenttiyksikköä. Suurimmillaan rakeisuuskäyrien ero (5 % tuhkaa 11 + 5 % kf ja 10 % tuhkaa 12 + 10 % kf) oli 1 mm:n seulan kohdalla, jossa ero oli 9,6 prosenttiyksikköä.

Kokeista saatuja tuloksia on pidettävä erittäin lupaavina. Suuren ominaispinta-alan omaavat puu- ja turvetuhkat voisivat korvata nykyisin käytetyn selluloosakuidun päällysteessä. Tarvittava ainesmäärä on kuitenkin tuhka-kohtainen, joten massasta on tehtävä aina toiminnallinen suhteitus. Tuhkan vaikutusta massan sään- ja vedenkestävyyteen sekä deformaatiokestävyyteen ei tutkittu tässä esiselvityksessä, jossa keskityttiin vain materiaalin toiminnan selvittämiseen SMA-massassa. Jatkokokein tulisi selvittää tuhkan vaikutus massojen pitkäaikaiskestävyyteen.

Suurimmalla osalla esitutkimukseen osallistuneista tuhista oli suhteellisen alhainen ominaispinta-ala. Näitä tuhkia ei voida käyttää kuidun korvaajina, mutta tuhkia voidaan ajatella käytettäväksi päällysteen täytejauheena kalkkikivijauheen sijasta. Käytökelpoisuuden selvittäminen vaatisi lisätutkimuksia.

6 YHTEENVETO

Tutkimus käsittelee esitutkimusluonteisesti turve- ja puutuhkien käyttöä SMA-päällysteen kuidun korvaajana. Tuhkia kokeiltiin myös asfalttimassan täytejauheena tuhka- ja kalkkikivijauheseoksena. Tutkimukseen hankittiin tuhkanäytteitä 13 eri paikkakunnalta. Näistä tuhista 7 oli peräisin pääosin turvetta polttavista kaukolämpölaitoksista ja 6 massa- ja paperiteollisuudesta.

Alkuperäisten, seulomattomien tuhkien (13 eri tuhkaa) ominaispinta-alat vaihtelivat välillä 4,0 - 97,3 m²/g keskiarvon ollessa 23,4 m²/g. Suurimmat arvot saatiin tuhilla 5, 11 ja 4, jotka valittiin tuhkan 12 ohella jatkokokeisiin. Tuhkien hienoainespitoisuudet (alle 0,063 mm materiaali) vaihtelivat välillä 17 - 92 %.

Tuhkien ominaispinta-alat eivät olleet riippuvaisia tuhkan alkuperästä. Niin eri turve- kuin eri puutuhkillakin ominaispinta-alat vaihtelivat suuresti. Seulan 0,063 mm läpäisyn perusteella tutkitut turvetuhkat olivat keskimäärin selvästi hienorakeisempia kuin puutuhkat. Turvetuhkien läpäisyprosentit olivat 50 - 88 (keskiarvo 70 %), kun taas puutuhkien läpäisyprosentit olivat 17 - 68 (keskiarvo 40 %).

Massakokeisiin valittujen neljän tuhkan ominaispinta-alat vaihtelivat välillä 15,1 - 97,3 m²/g ja alle 0,063 mm:n aineksen ominaispinta-alat välillä 14,5 - 86,9 m²/g. Vedenadsorptiot olivat 3,0 - 11,0 % ja 0,8 - 4,2 mg/m². Hehkutushäviöt olivat 6,1 - 35,9 %, tyhjätilat (< 0,063 mm aines) 54,5 - 65,4 % ja seulan 0,063 mm läpäisyarvot 14 - 84 %.

Tuhkan 5 seitsemän kuukauden ajanjakson aikana hehkutushäviöt (yli 40 määrittystä) vaihtelivat 4,6 %:sta 30,9 %:iin ja ominaispinta-alat (5 määrittystä) 34,6 m²/g:sta 188,4 m²/g:aan. Ominaispinta-alat ja hehkutushäviöt korreloivat hyvin keskenään.

Alustavan sitoutumiskokeen perusteella 12 g tuhkaa sitoi tuhkan laadusta riippuen 5 - 15 g sideainetta, kun taas 3 g Arbocel-kuitua sitoo normaalisti noin 17 g sideainetta. Tilavuussuhteiksi muutettuna 30 ml tuhkaa, joka vastaa tuhkalaadusta riippuen 11,5 - 27,0 g tuhkaa, sitoi 12 - 16 g sideainetta. 30 ml eli 31,3 g kalkkikivijauhetta sitoi puolestaan 7 g bitumia.

Alustavan sitoutumiskokeen jälkeen tehdyn dekkakokeen bitumihävikkien perusteella tuhkille 5 ja 11 saatiin riittävä sitoutuminen. Sen sijaan tuhkia 4 ja 12 ei saatu sitomaan sideainetta tarpeeksi hyvin. Tulokset olivat edellä mainitun kaltaisia myös täytejauhekokeessa, jossa täytejauheena (10 %) oli tuhkan ja kalkkikivijauheen seos (1 : 1).

Vertaamalla sitoutumiskokeissa parhaiten menestyneiden tuhkien 11 ja 5 ominaisuuksia huonosti menestyneisiin tuhkiin 4 ja 12 havaitaan, että ensin mainittujen tuhkien ominaispinta-alat (alkuperäinen näyte), vedenadsorptiot ja hehkutushäviöt ovat selvästi suurempia kuin viimeksi mainittujen tuhkien.

Massakokeet tehtiin SMA 18-massalla, jonka kiviaineksena käytettiin Koskenkylän kiveä. Tuhkien vaikutus massojen suhteitusominaisuuksiin testattiin ICT-kiertotiivistimellä. Kokeissa kahta tuhkaa (tuhkat 5 ja 11) käytettiin erikseen sekä pelkästään kuidun korvaajana että kuidun korvaajana ja täytejauheena samanaikaisesti. Kahta muuta tuhkaa (tuhkat 4 ja 12) käytettiin vain kuitumaisesti.

ICT-kokeet tehtiin sideainepitoisuuksilla 6,1, 6,5 ja 6,9 %. Tuhkia 5 ja 11 käytettäessä massojen ulkonäkö ei poikennut perinteisistä massoista. Massat eivät myöskään tiivistyksessä käyttäytyneet poikkeavasti. Tuhkilla 4 ja 12 massat olivat sekoitettaessa ulkonäöltään kuivia, mutta tiivistettäessä sideaine vapautui ja massat tiivistyivät erittäin hyvin.

Suuren ominaispinta-alan omaavat tuhkat 5 ja 11 toimivat pieninä lisäyksinä kuitumaisesti käytettynä, sideainetta sitovana ainesosana. Suurina lisäyksinä, osana hienoainesta suuresta ominaispinta-alasta johtuen niiden käyttö on epätaloudellista, koska sideainemäärä kasvaa tavanomaista pitoisuutta suuremmaksi. Alhaisen ominaispinta-alan omaavat tuhkat 4 ja 12 eivät sitoneet sideainetta riittävästi ja pysyvästi, jotta niitä voitaisiin käyttää kuidun korvaajina.

ICT-kiertotiivistimen suurempaa (150 mm halkaisija) muottikokoa käyttäen massat tiivistyivät selvästi paremmin. Karkeita massoja tutkittaessa tulisikin tiivistystyössä käyttää halkaisijaltaan 150 mm:n muottikokoa. Myös vertailtavuus kentällä saavutettaviin tuloksiin olisi ilmeisesti parempi suurempaa muottikokoa käyttäen.

Kokeista saatuja tuloksia on pidettävä erittäin lupaavina. Suuren ominaispinta-alan omaavat puu- ja turvetuhkat voisivat olla vaihtoehtoisia materiaaleja nykyisin päällysteessä käytetylle selluloosakuidulle. Tarvittava ainesmäärä on kuitenkin tuhkaehtainen, joten massasta on tehtävä aina toiminnallinen suhteitus.

7 KIRJALLISUUS

- /1/ Vahvelainen, S. ja Isaksson K.-E. (1992): Teollisuuden jätteet. Ympäristö 1992:1. Helsinki 1992.
- /2/ Metsäteollisuus ry (1995): Ympäristönsuojelun vuosikirja. Toim. A. Karessuo. Espoo 1995.
- /3/ Lämpölaitosyhdistys ry (1994): Kaukolämpötilasto 1993.
- /4/ Alkio, R. ja Vuorinen, J. (1995): Asfalttimassan ominaisuuksien parantaminen lentotuhkalla. Tielaitos, kehittämiskeskus

Tilaaaja: TIEL Uudenmaan tiepiiri

Kohde:

Massa: SMA 18

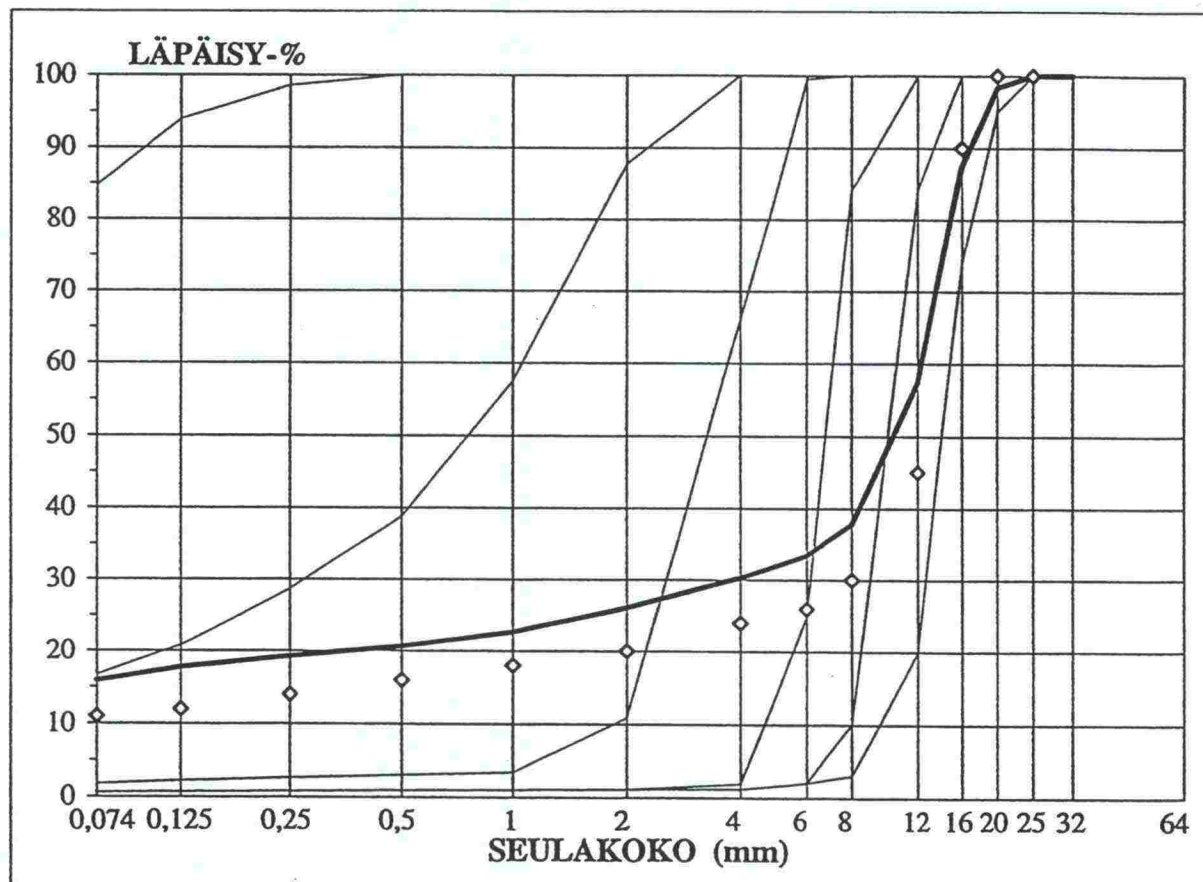
Sideaine: B80

Täytejauhe: kf / tuhka

Lisäaineet: Kuitu Arbocel

Kiviaines: Koskenkylän vulkaniitti

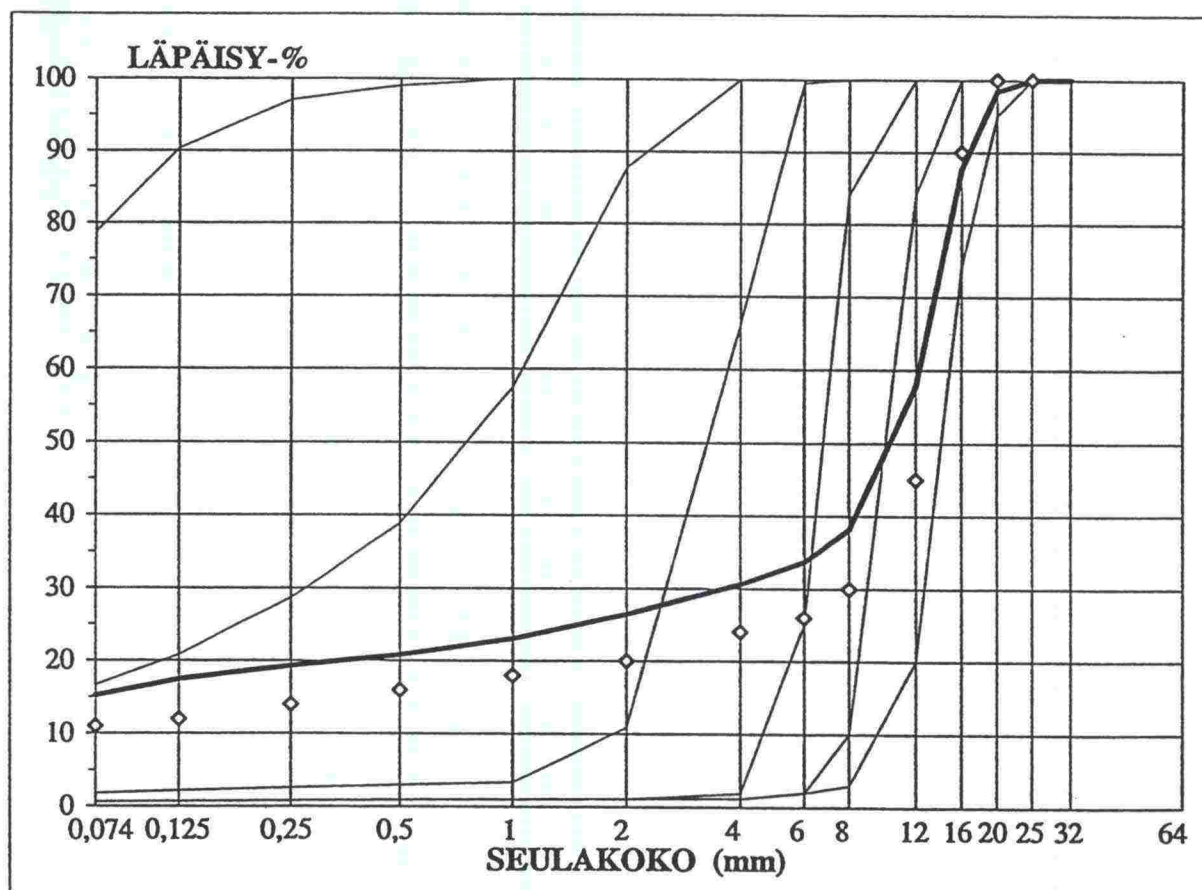
Muuta: 10 % kf + 5,2 % tuhkaa no. 4



Seososuudet:				15,2 %	9,0 %	5,0 %	5,0 %	14,0 %	51,8 %
Seula	Tavoite	Seos	tj	0-2	2-5	5-8	8-12	12-18	
0,074	11	15,9	84,7	16,7	1,8	0,6	0,6	0,6	
0,125	12	17,8	93,9	20,8	2,2	0,7	0,7	0,7	
0,25	14	19,3	98,6	28,6	2,6	0,8	0,8	0,8	
0,5	16	20,7	100	38,8	3	0,9	0,9	0,9	
1	18	22,8	100	57,5	3,4	1	1	1	
2	20	26,1	100	87,7	10,9	1,1	1,1	1,1	
4	24	30,3	100	100	66,1	1,9	1,2	1,2	
6	26	33,4	100	100	99,5	25	2	2	
8	30	37,9	100	100	100	84	10	3	
12	45	57,5	100	100	100	100	84	20	
16	90	87,5	100	100	100	100	100	74	
20	100	98,4	100	100	100	100	100	95	
25	100	100,0	100	100	100	100	100	100	
32		100,0	100	100	100	100	100	100	

LIITE 1/2

Tilaaja:	TIEL Uudenmaan tiepiiri
Kohde:	
Massa:	SMA 18
Sideaine:	B80
Täytejauhe:	kf / tuhka
Lisäaineet:	Kuitu Arbocel
Kiviaines:	Koskenkylän vulkaniitti
Muuta:	10 % kf + 5,5 % tuhkaa no. 5



Seososuudet:				15,5 %	9,0 %	5,0 %	5,0 %	14,0 %	51,5 %
Seula	Tavoite	Seos	tj	0-2	2-5	5-8	8-12	12-18	
0,074	11	15,2	78,7	16,7	1,8	0,6	0,6	0,6	
0,125	12	17,5	90,3	20,8	2,2	0,7	0,7	0,7	
0,25	14	19,3	97	28,6	2,6	0,8	0,8	0,8	
0,5	16	20,8	99	38,8	3	0,9	0,9	0,9	
1	18	23,1	100	57,5	3,4	1	1	1	
2	20	26,4	100	87,7	10,9	1,1	1,1	1,1	
4	24	30,6	100	100	66,1	1,9	1,2	1,2	
6	26	33,7	100	100	99,5	25	2	2	
8	30	38,1	100	100	100	84	10	3	
12	45	57,8	100	100	100	100	84	20	
16	90	87,6	100	100	100	100	100	74	
20	100	98,4	100	100	100	100	100	95	
25	100	100,0	100	100	100	100	100	100	
32		100,0	100	100	100	100	100	100	

Tilaaaja: TIEL Uudenmaan tiepiiri

Kohde:

Massa: SMA 18

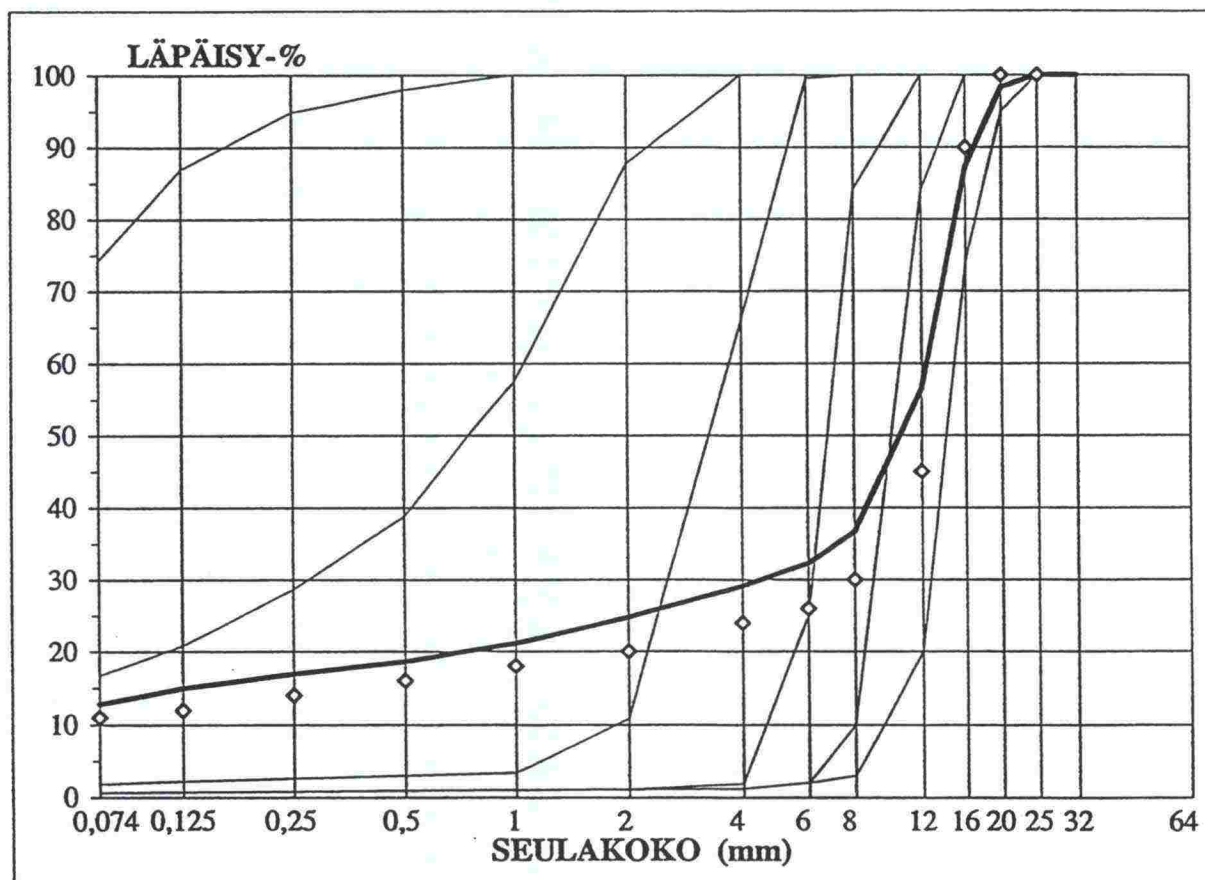
Sideaine: B80

Täytejauhe: kf / tuhka

Lisäaineet: Kuitu Arbocel

Kiviaines: Koskenkylän vulkaniitti

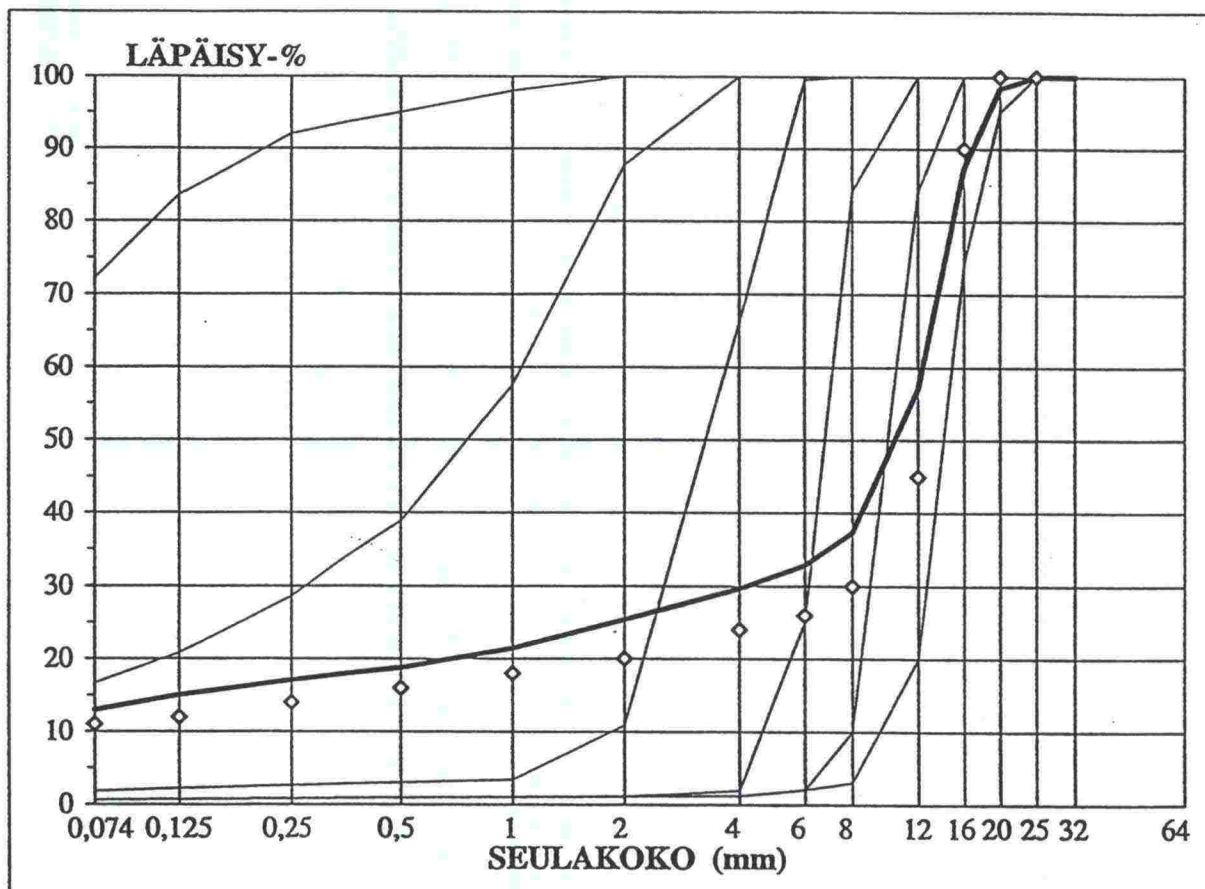
Muuta: 5 % kf + 8 % tuhkaa no. 5



Seososuudet:			13,0 %	10,0 %	5,0 %	5,0 %	14,0 %	53,0 %
Seula	Tavoite	Seos	tj	0-2	2-5	5-8	8-12	12-18
0,074	11	12,8	74,2	16,7	1,8	0,6	0,6	0,6
0,125	12	15,0	86,9	20,8	2,2	0,7	0,7	0,7
0,25	14	16,9	94,8	28,6	2,6	0,8	0,8	0,8
0,5	16	18,6	98	38,8	3	0,9	0,9	0,9
1	18	21,1	100	57,5	3,4	1	1	1
2	20	24,8	100	87,7	10,9	1,1	1,1	1,1
4	24	29,1	100	100	66,1	1,9	1,2	1,2
6	26	32,3	100	100	99,5	25	2	2
8	30	36,7	100	100	100	84	10	3
12	45	56,6	100	100	100	100	84	20
16	90	87,2	100	100	100	100	100	74
20	100	98,4	100	100	100	100	100	95
25	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32		100,0	100	100	100	100	100	100

LIITE 1/4

Tilaaaja:	TIEL Uudenmaan tiepiiri
Kohde:	
Massa:	SMA 18
Sideaine:	B80
Täytejauhe:	kf / tuhka
Lisäaineet:	Kuitu Arbocel
Kiviaines:	Koskenkylän vulkaniitti
Muuta:	10 % kf + 3,6 % tuhkaa no.11



Seososuudet:			13,6 %	10,0 %	5,0 %	5,0 %	14,0 %	52,4 %
Seula	Tavoite	Seos	tj	0-2	2-5	5-8	8-12	12-18
0,074	11	13,0	72,2	16,7	1,8	0,6	0,6	0,6
0,125	12	15,0	83,5	20,8	2,2	0,7	0,7	0,7
0,25	14	17,1	92	28,6	2,6	0,8	0,8	0,8
0,5	16	18,8	95	38,8	3	0,9	0,9	0,9
1	18	21,5	98	57,5	3,4	1	1	1
2	20	25,4	100	87,7	10,9	1,1	1,1	1,1
4	24	29,7	100	100	66,1	1,9	1,2	1,2
6	26	32,9	100	100	99,5	25	2	2
8	30	37,3	100	100	100	84	10	3
12	45	57,0	100	100	100	100	84	20
16	90	87,4	100	100	100	100	100	74
20	100	98,4	100	100	100	100	100	95
25	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32		100,0	100	100	100	100	100	100

Tilaaja: TIEL Uudenmaan tiepiiri

Kohde:

Massa: SMA 18

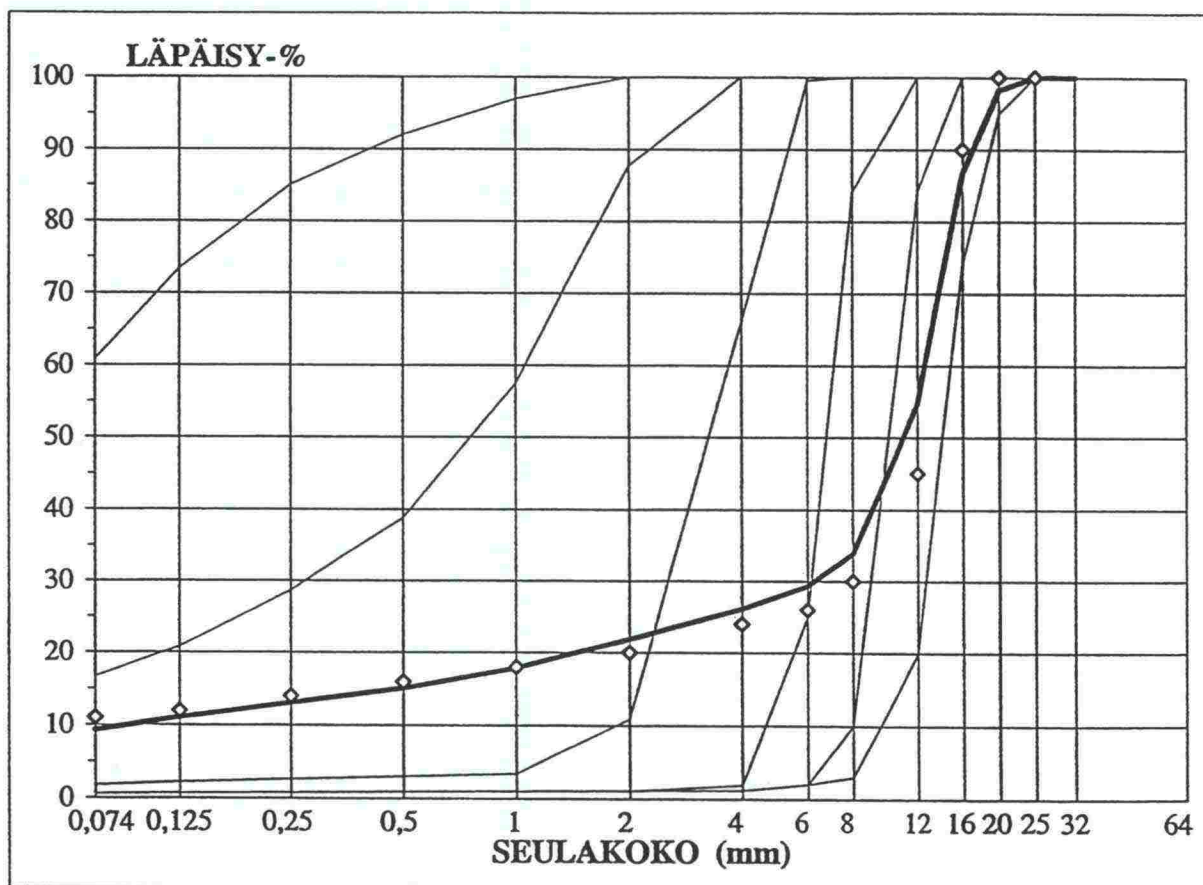
Sideaine: B80

Täytejauhe: kf / tuhka

Lisäaineet: Kuitu Arbocel

Kiviaines: Koskenkylän vulkaniitti

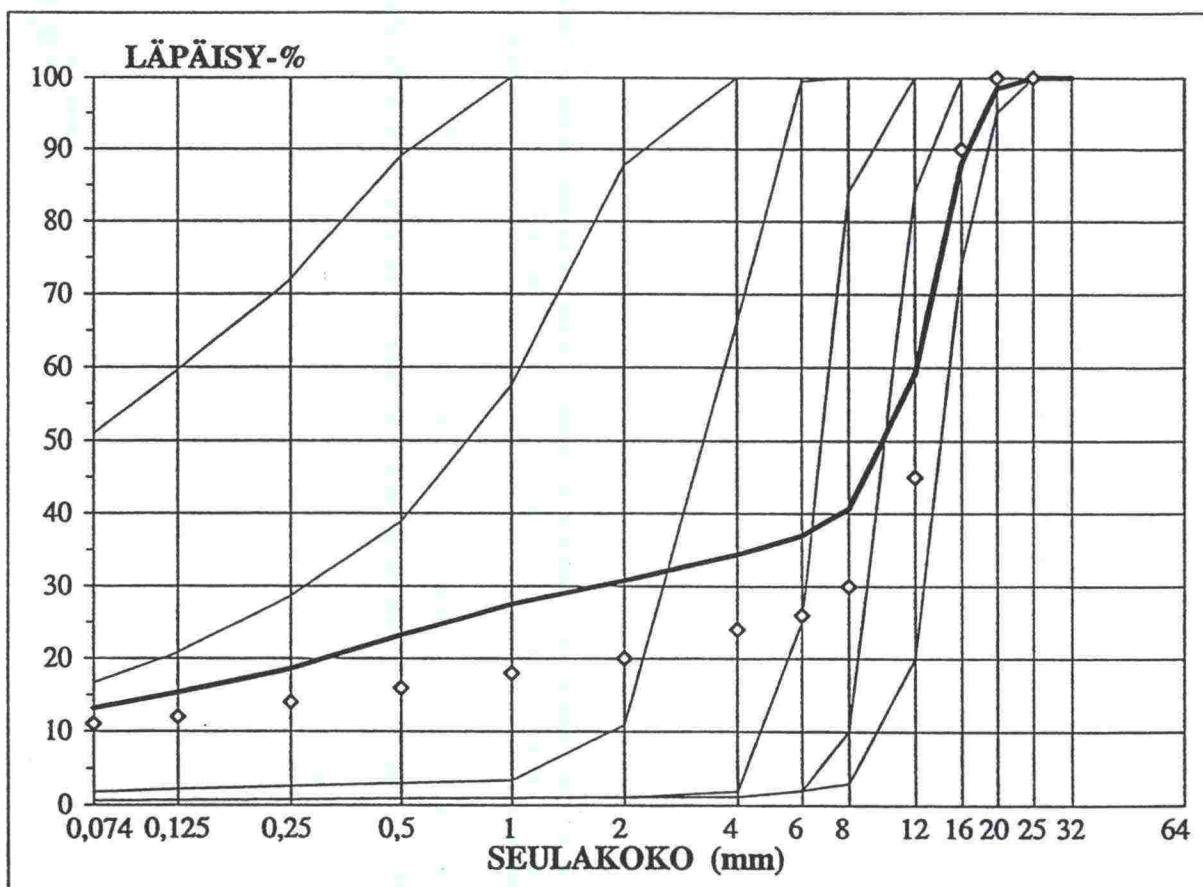
Muuta: 5 % kf + 5 % tuhkaa no.11



Seososuudet:				10,0 %	10,0 %	5,0 %	5,0 %	15,0 %	55,0 %
Seula	Tavoite	Seos	tj	0-2	2-5	5-8	8-12	12-18	
0,074	11	9,3	60,8	16,7	1,8	0,6	0,6	0,6	
0,125	12	11,1	73,4	20,8	2,2	0,7	0,7	0,7	
0,25	14	13,1	85	28,6	2,6	0,8	0,8	0,8	
0,5	16	15,1	92	38,8	3	0,9	0,9	0,9	
1	18	17,9	97	57,5	3,4	1	1	1	
2	20	21,8	100	87,7	10,9	1,1	1,1	1,1	
4	24	26,1	100	100	66,1	1,9	1,2	1,2	
6	26	29,3	100	100	99,5	25	2	2	
8	30	33,9	100	100	100	84	10	3	
12	45	54,8	100	100	100	100	84	20	
16	90	86,7	100	100	100	100	100	74	
20	100	98,3	100	100	100	100	100	95	
25	100	100,0	100	100	100	100	100	100	
32		100,0	100	100	100	100	100	100	

LITE 1/6

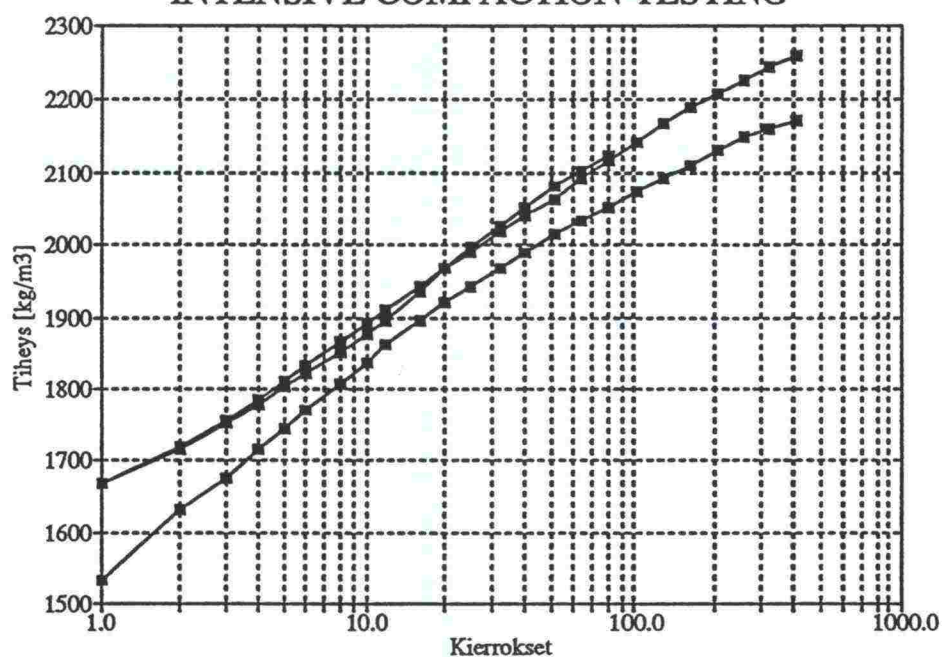
Tilaaja:	TIEL Uudenmaan tiepiiri
Kohde:	
Massa:	SMA 18
Sideaine:	B80
Täytejauhe:	kf / tuhka
Lisäaineet:	Kuitu Arbocel
Kiviaines:	Koskenkylän vulkaniitti
Muuta:	10 % kf + 10 % tuhkaa no.12



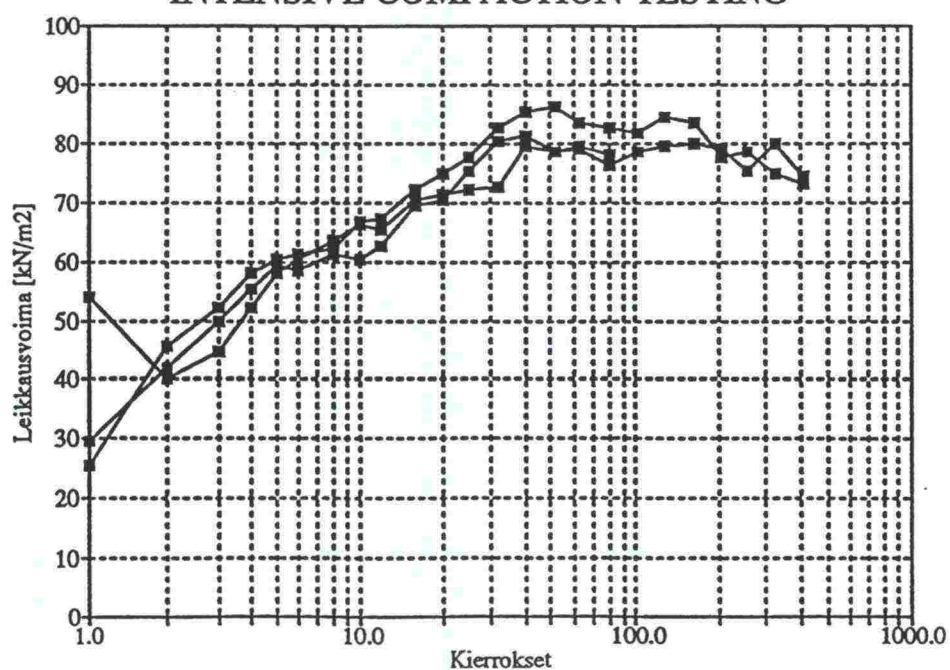
Seososuudet:			20,0 %	9,0 %	4,0 %	4,0 %	13,0 %	50,0 %
Seula	Tavoite	Seos	tj	0-2	2-5	5-8	8-12	12-18
0,074	11	13,2	50,9	16,7	1,8	0,6	0,6	0,6
0,125	12	15,3	59,6	20,8	2,2	0,7	0,7	0,7
0,25	14	18,6	72	28,6	2,6	0,8	0,8	0,8
0,5	16	23,2	89	38,8	3	0,9	0,9	0,9
1	18	27,5	100	57,5	3,4	1	1	1
2	20	30,8	100	87,7	10,9	1,1	1,1	1,1
4	24	34,4	100	100	66,1	1,9	1,2	1,2
6	26	36,9	100	100	99,5	25	2	2
8	30	40,7	100	100	100	84	10	3
12	45	59,1	100	100	100	100	84	20
16	90	88,0	100	100	100	100	100	74
20	100	98,5	100	100	100	100	100	95
25	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32		100,0	100	100	100	100	100	100

TUHKA 4 / LISÄYS 5,2 % / SA 6,1 %

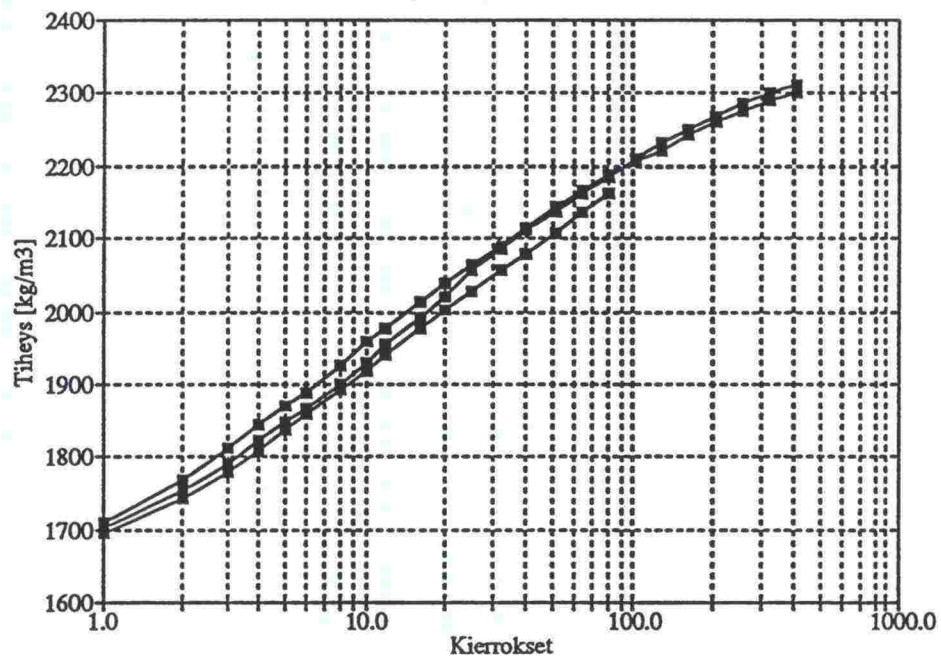
INTENSIVE COMPACTION TESTING



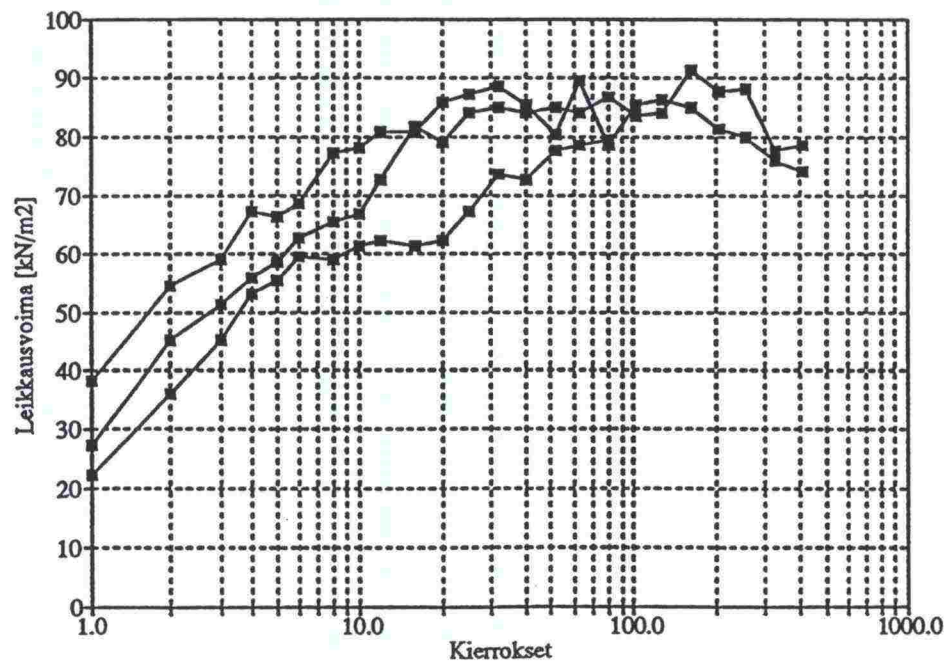
INTENSIVE COMPACTION TESTING



INTENSIVE COMPACTION TESTING

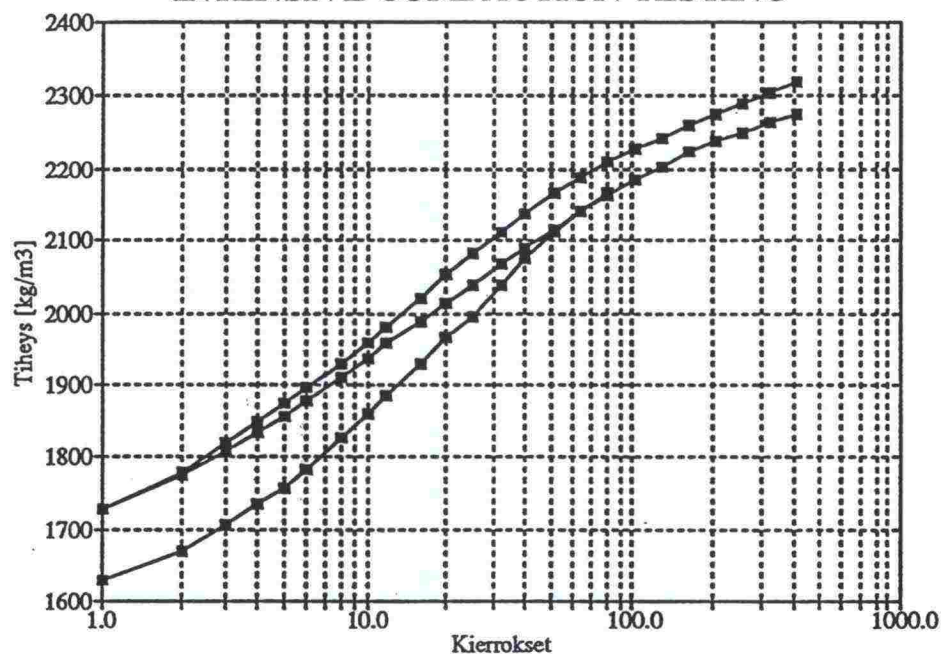


INTENSIVE COMPACTION TESTING

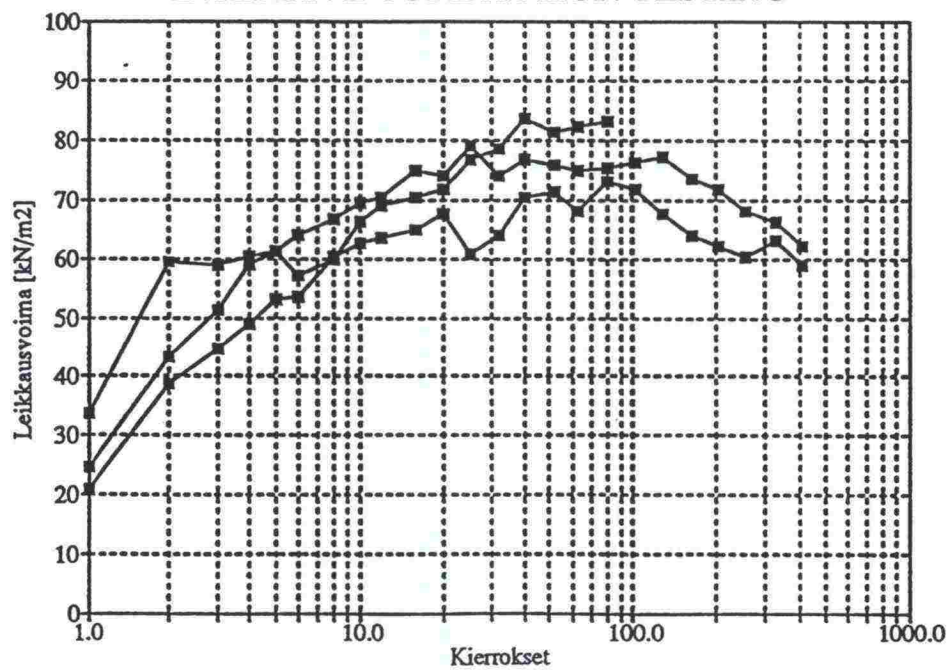


TUHKA 4 / LISÄYS 5,2 % / SA 6,9 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

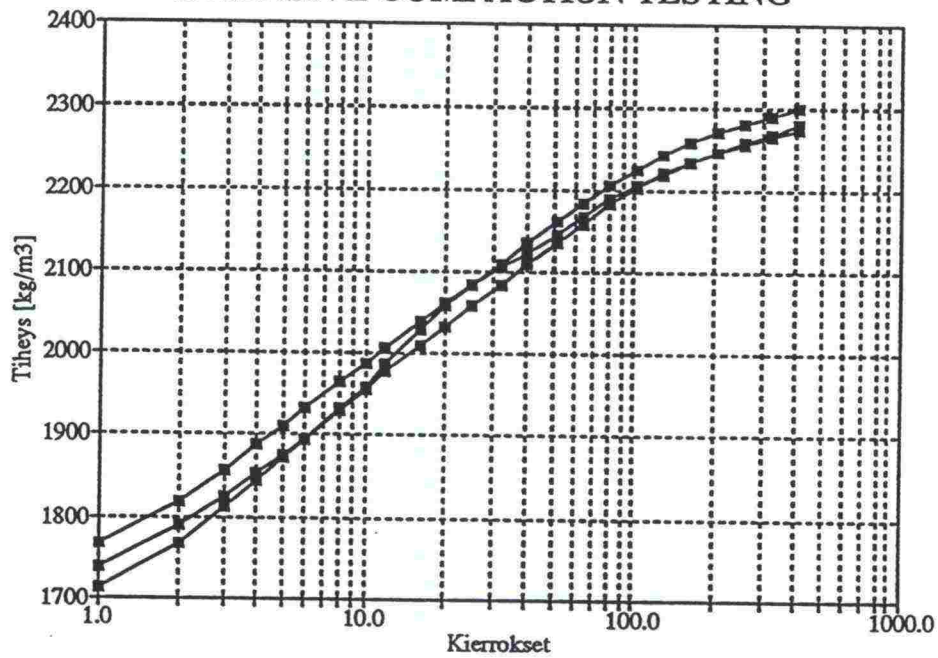


INTENSIVE COMPACTION TESTING

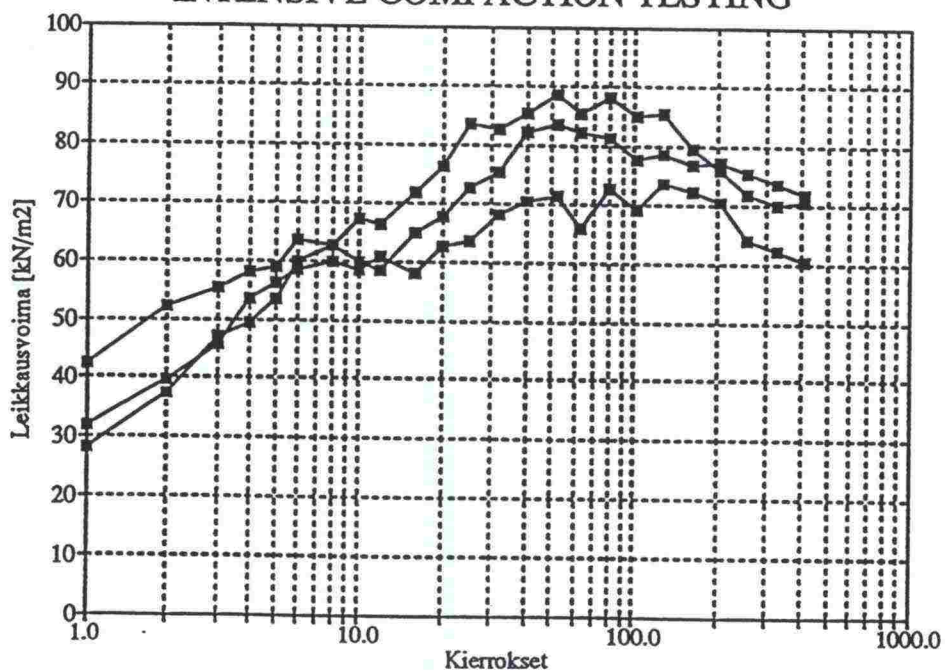


TUHKKA 5 / LISÄYS 5,5 % / SA 6,1 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

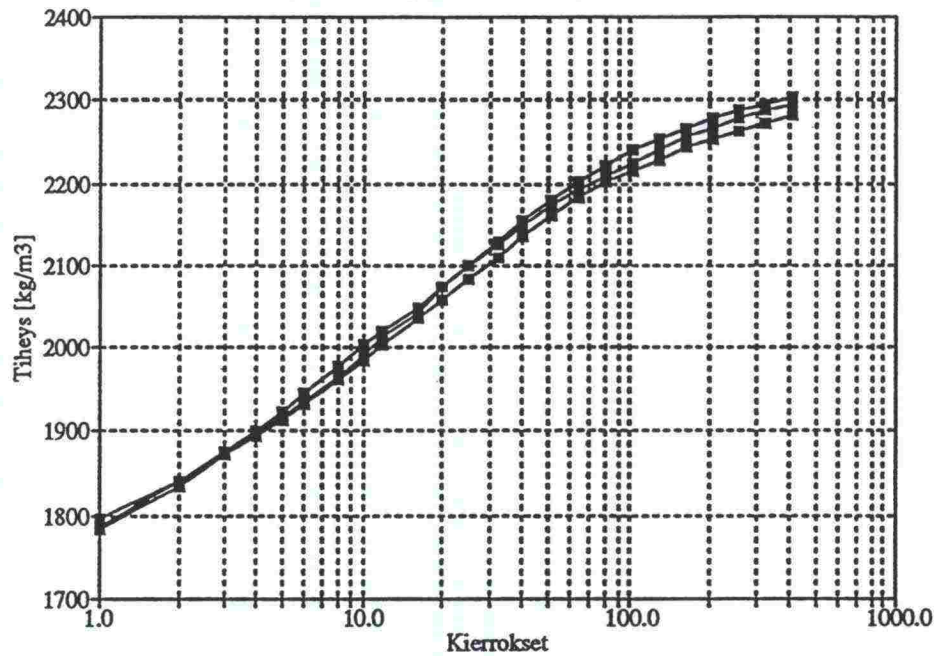


INTENSIVE COMPACTION TESTING

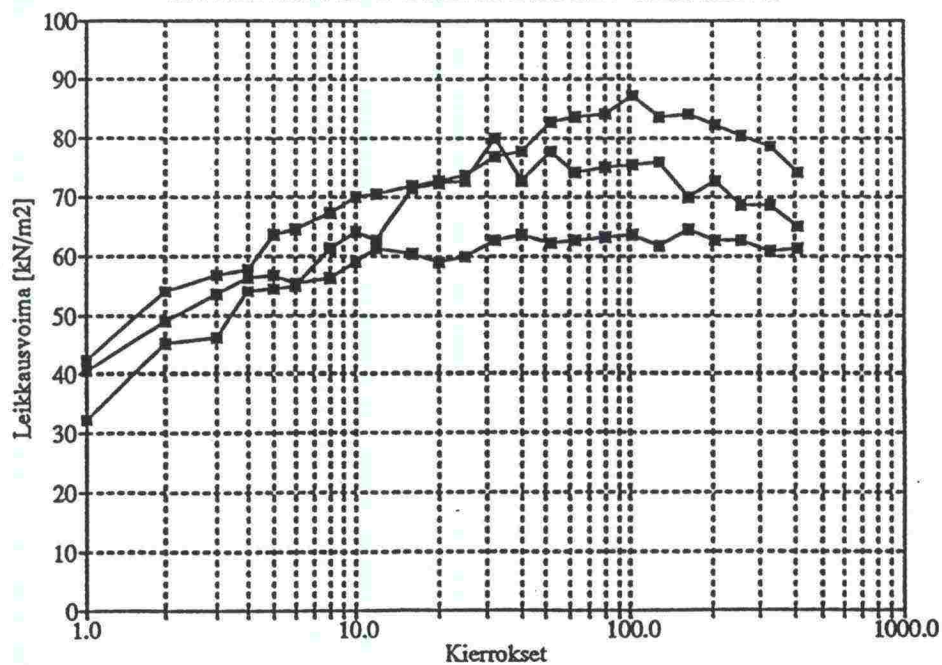


TUHKA 5 / LISÄYS 5,5 % / SA 6,5 %

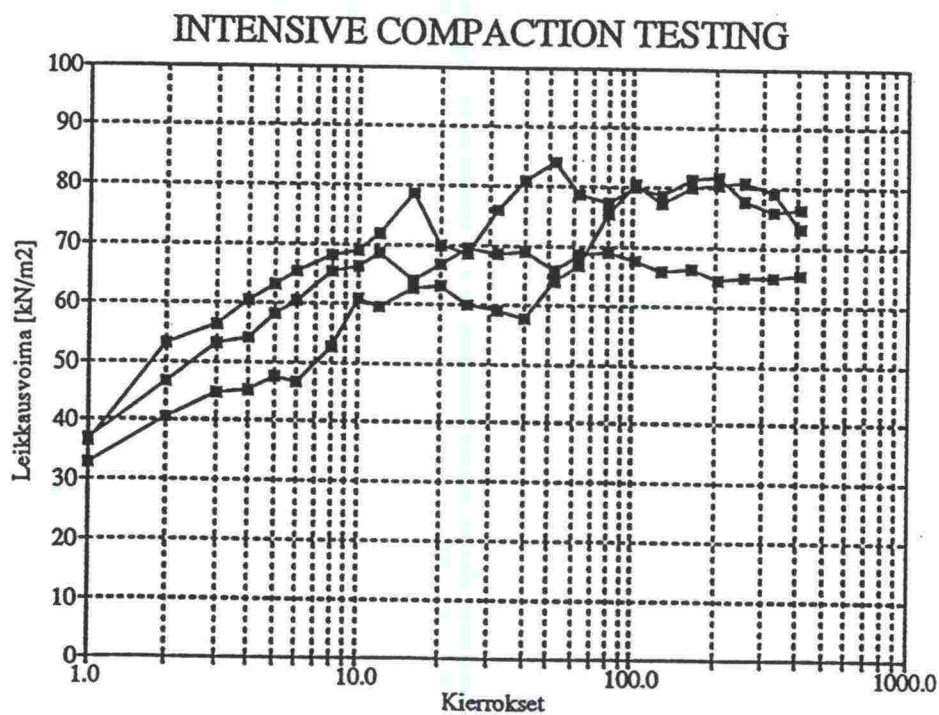
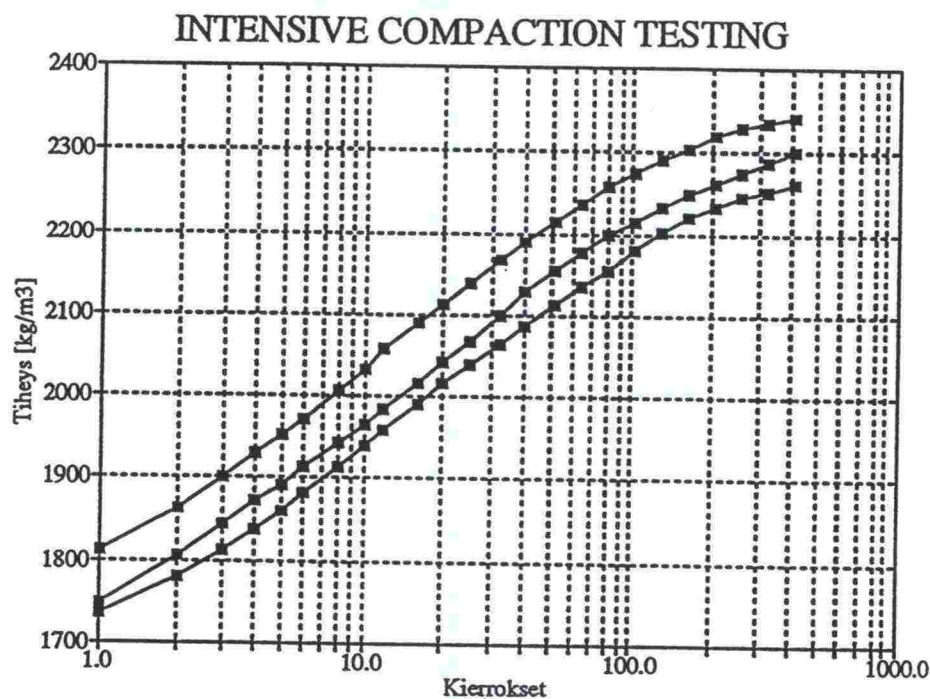
INTENSIVE COMPACTION TESTING



INTENSIVE COMPACTION TESTING

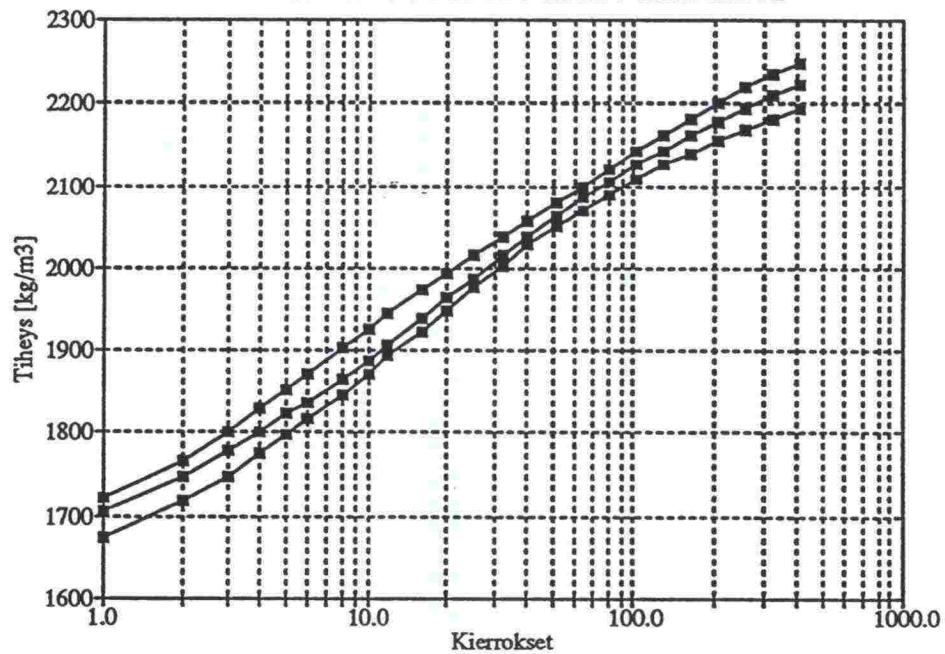


TUHKA 5 / LISÄYS 5,5 % / SA 6,9 %

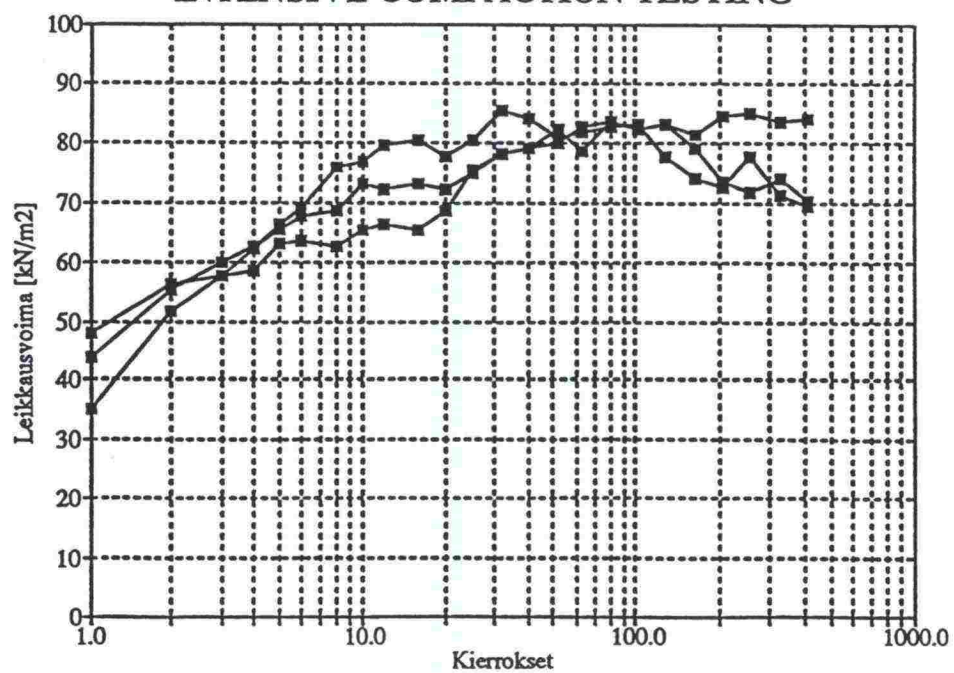


TUHKA 5 / 8 % + KF 5 % / SA 6,1 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

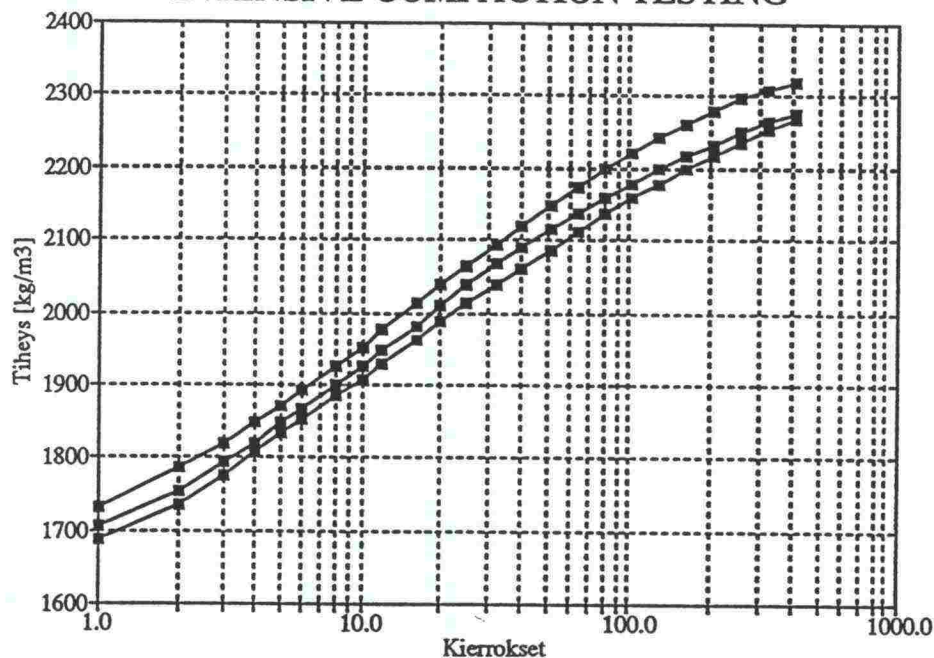


INTENSIVE COMPACTION TESTING

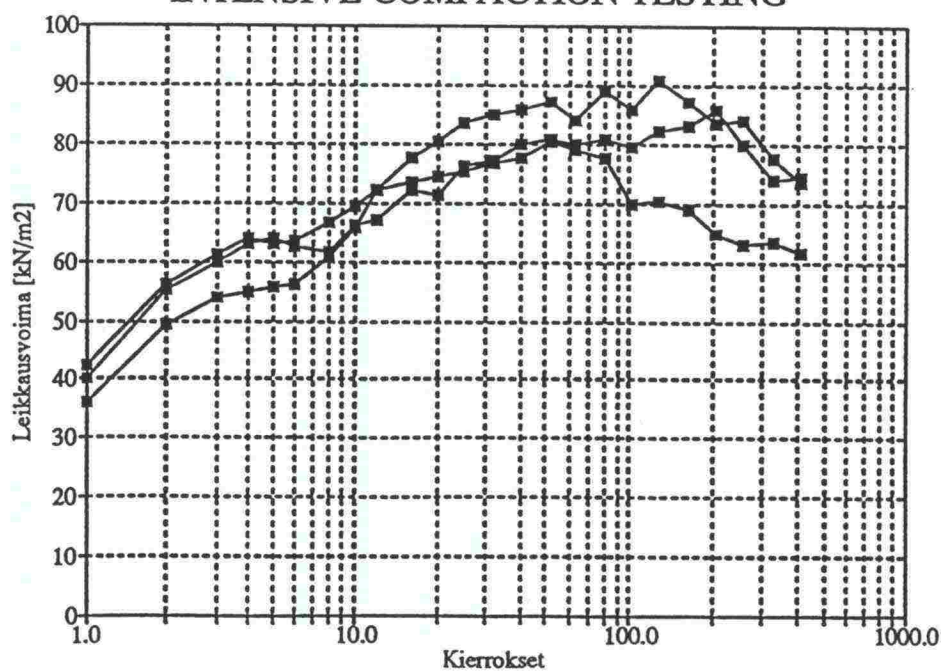


TUHKA 5 / 8 % + KF 5 % / SA 6,5 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

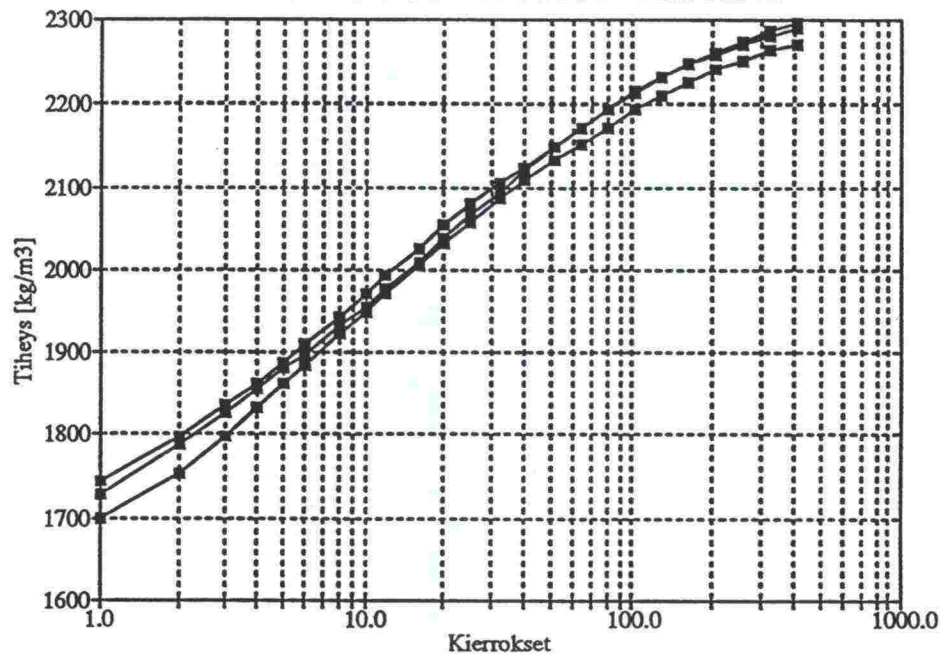


INTENSIVE COMPACTION TESTING

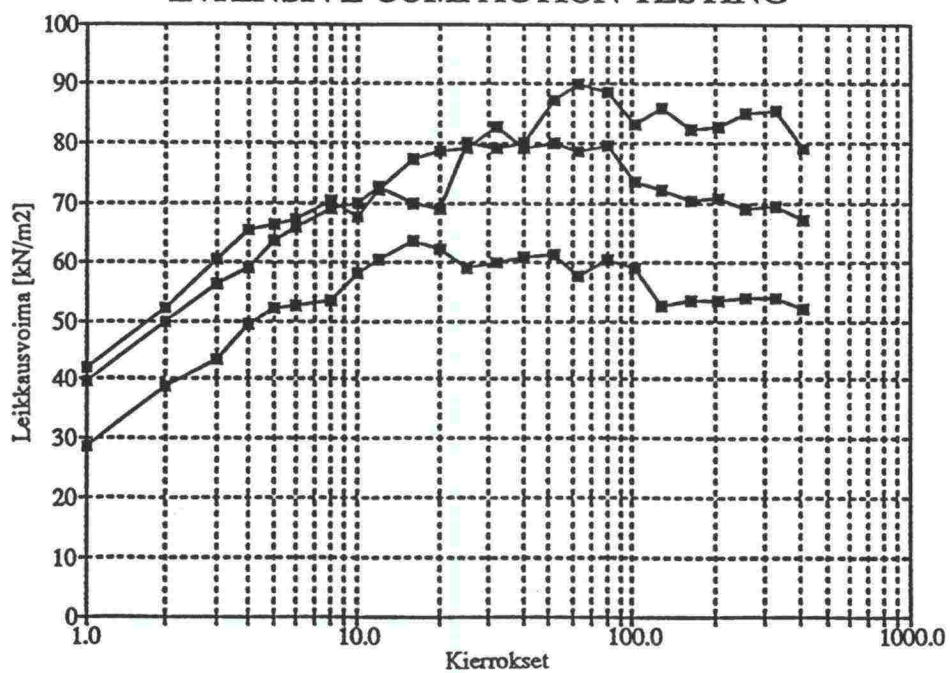


TUHKA 5 / 8 % + KF 5 % / SA 6,9 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

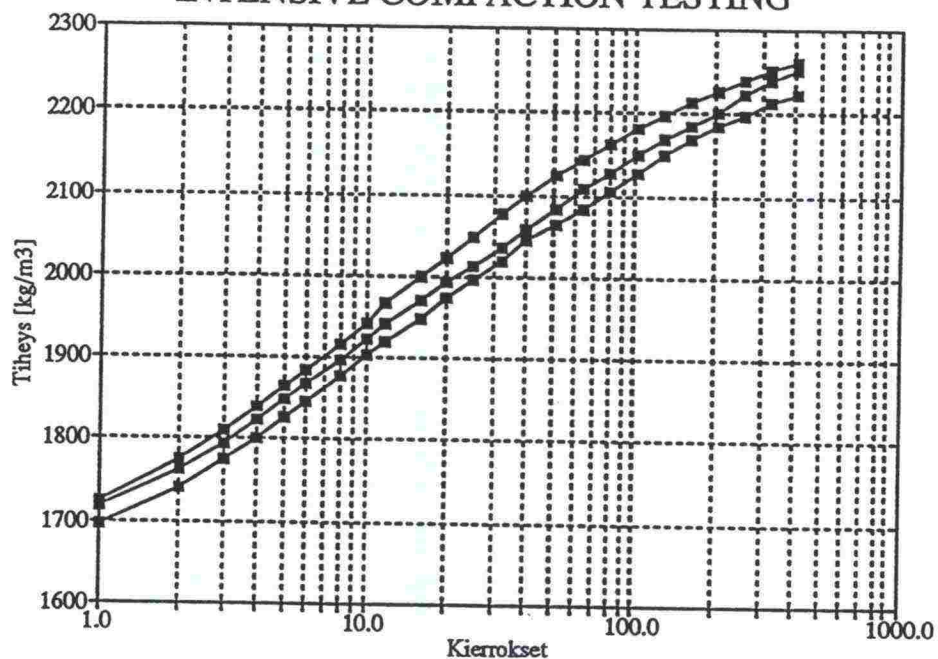


INTENSIVE COMPACTION TESTING

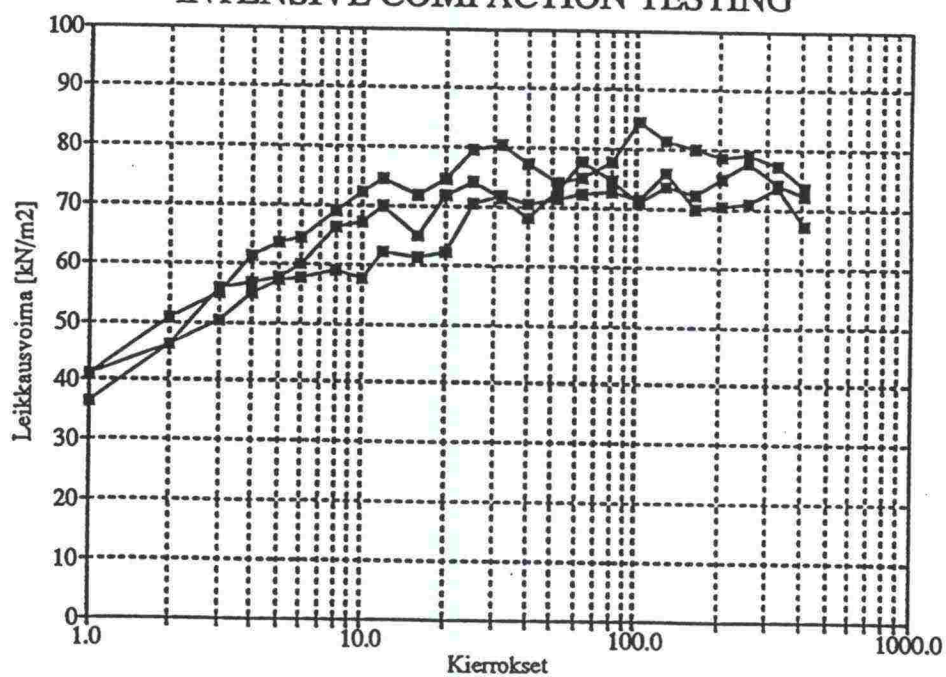


TUHKA 11 / LISÄYS 3,6 % / SA 6,1 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

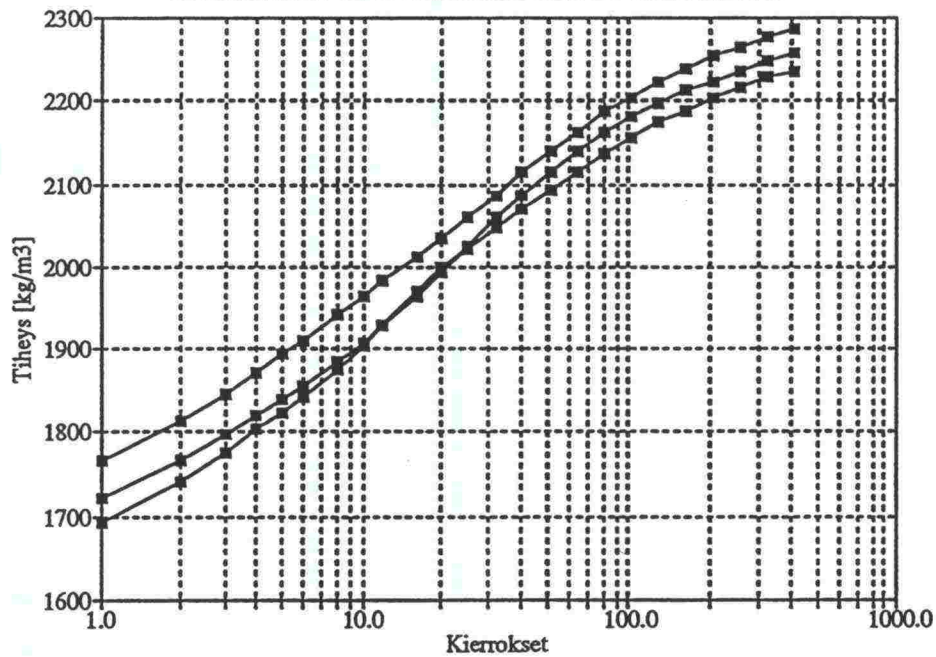


INTENSIVE COMPACTION TESTING

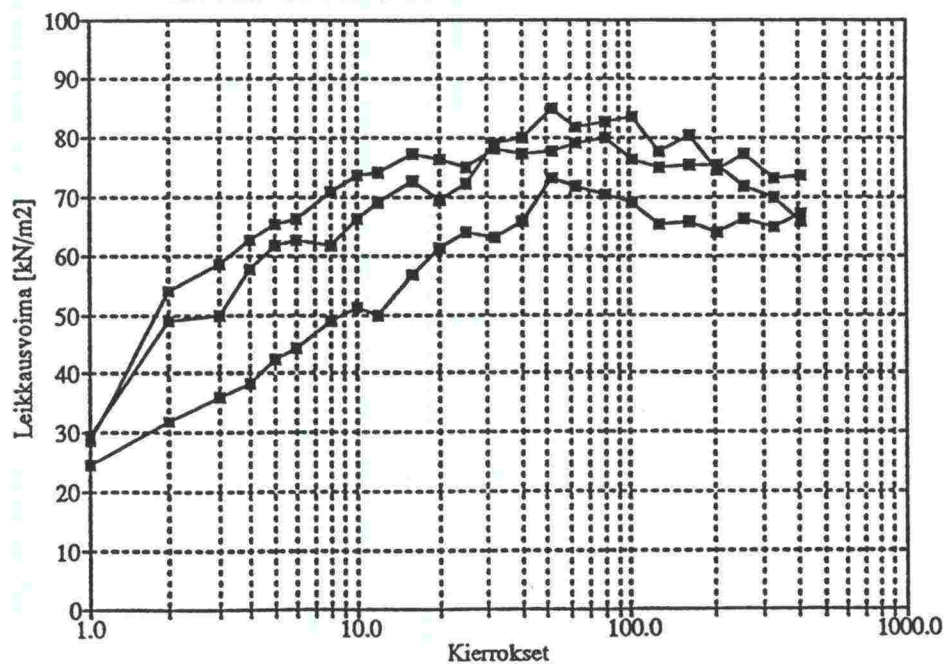


TUHKA 11 / LISÄYS 3,6 % / SA 6,5 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

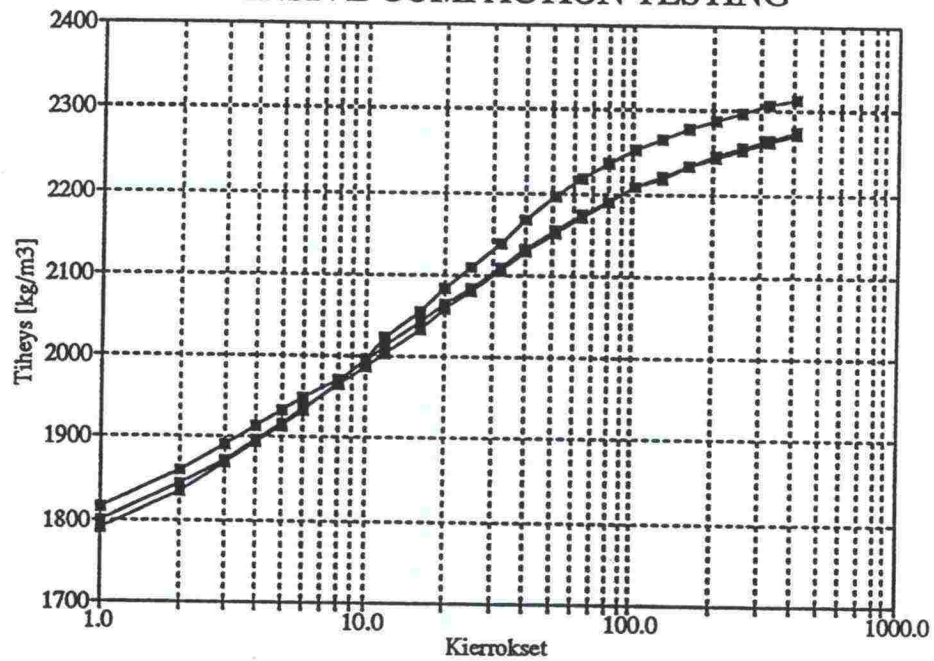


INTENSIVE COMPACTION TESTING

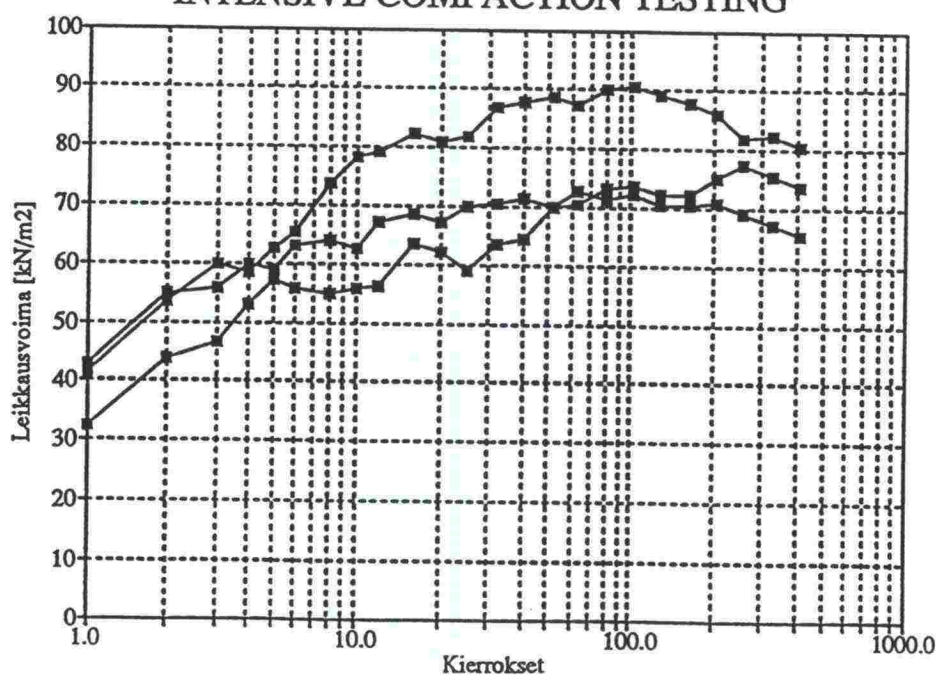


TUHKA 11 / LISÄYS 3,6 % / SA 6,9 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

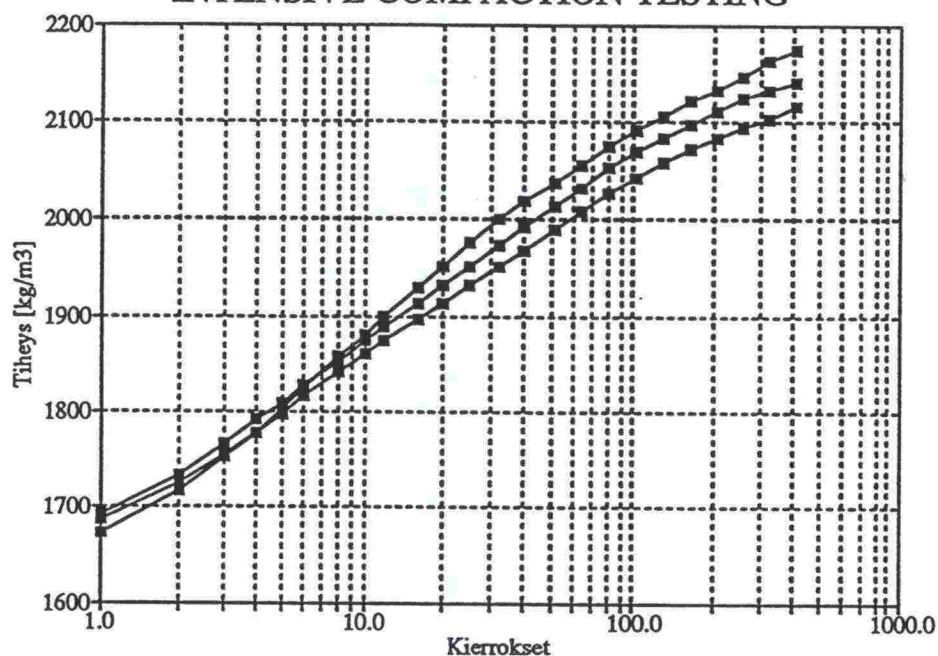


INTENSIVE COMPACTION TESTING

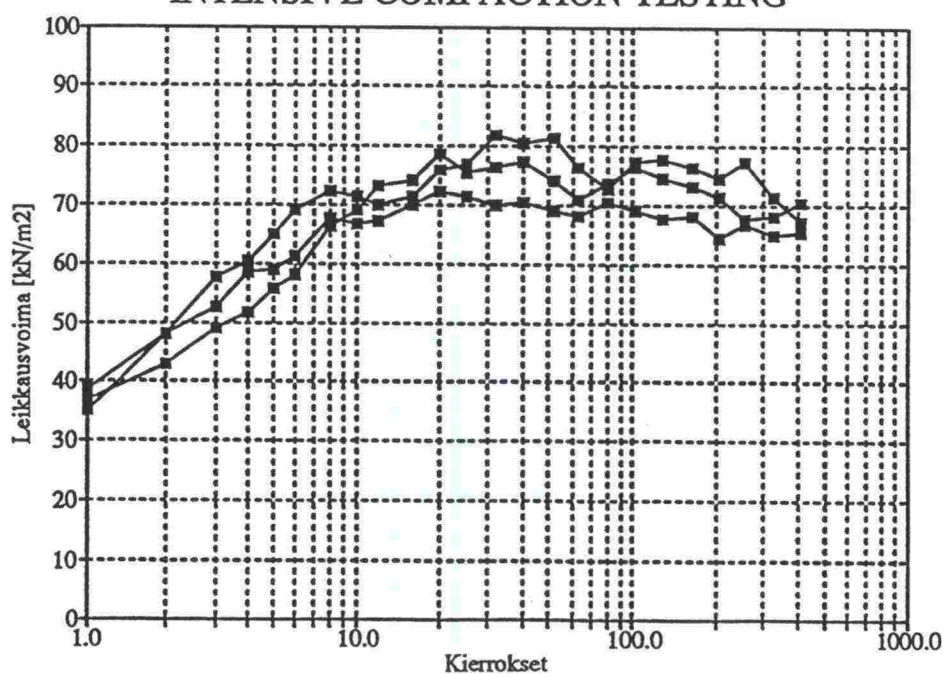


TUHKA 11 / 5 % + KF 5 % / SA 6,1 %

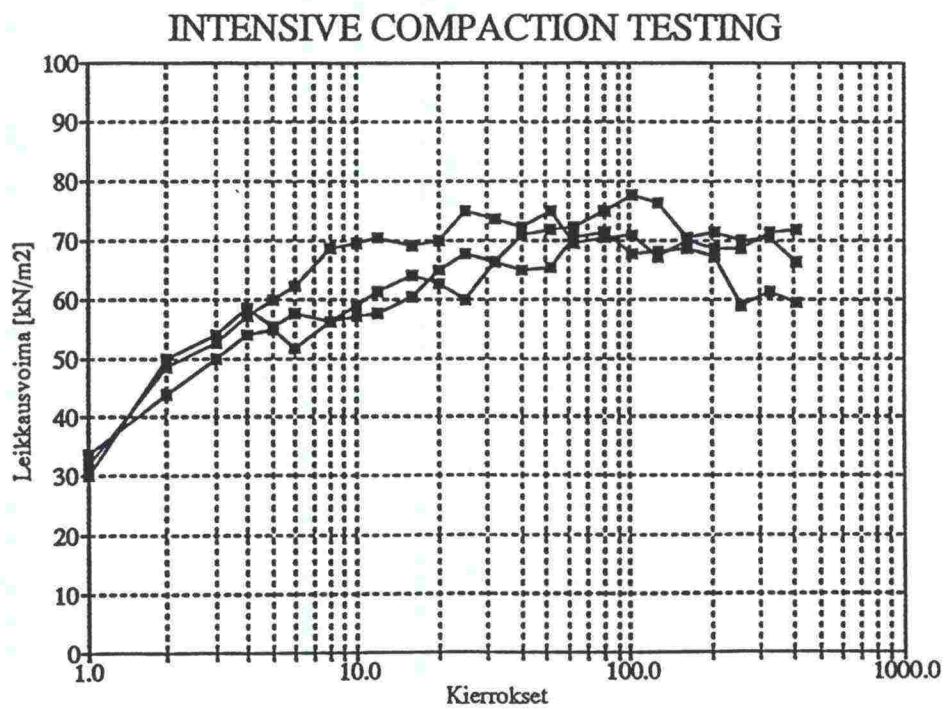
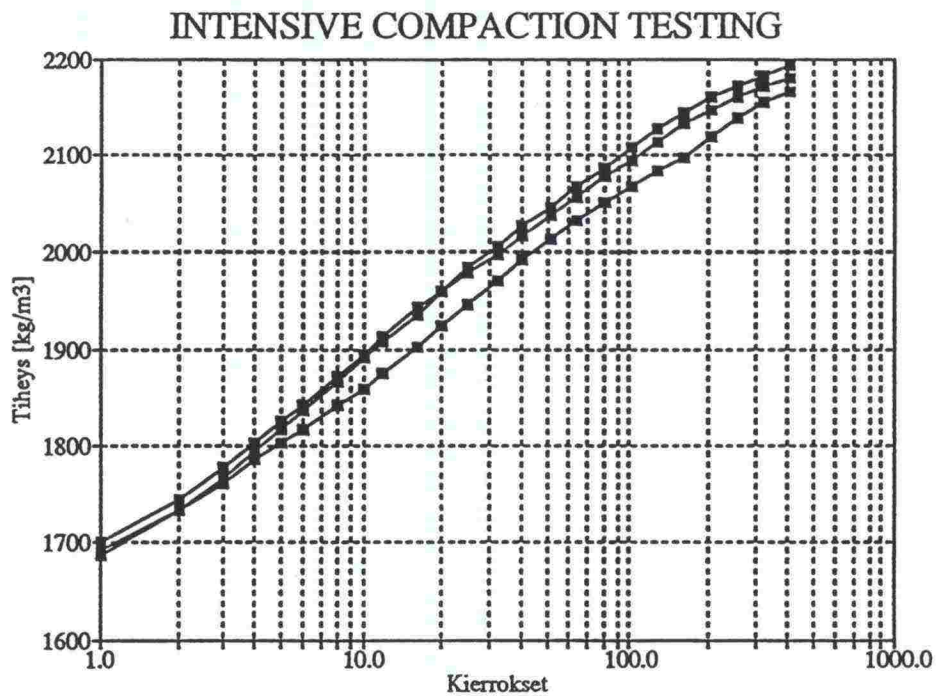
INTENSIVE COMPACTION TESTING



INTENSIVE COMPACTION TESTING

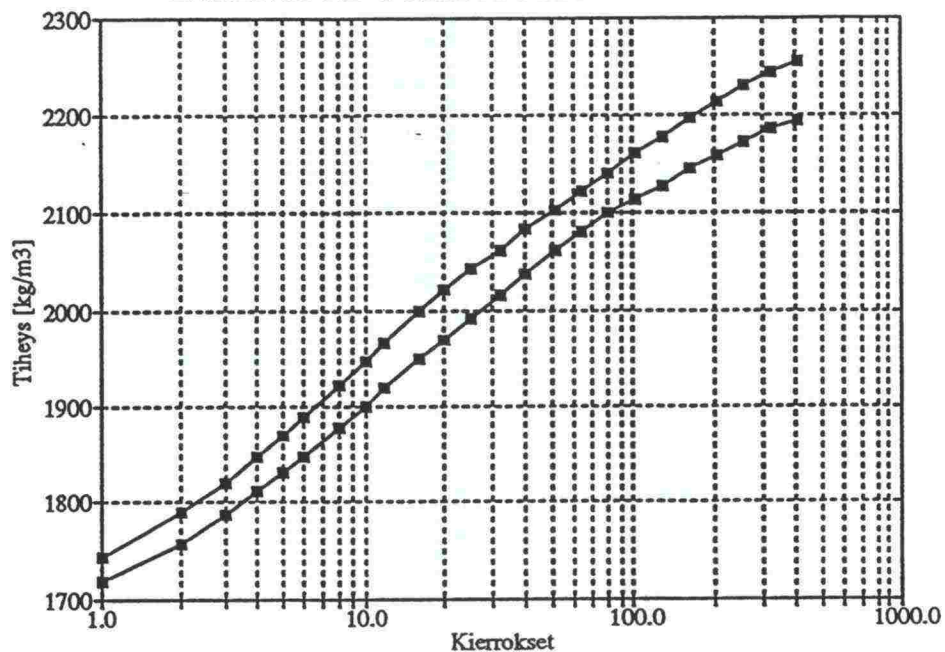


TUHKA 11 / 5 % + KF 5 % / SA 6,5 %

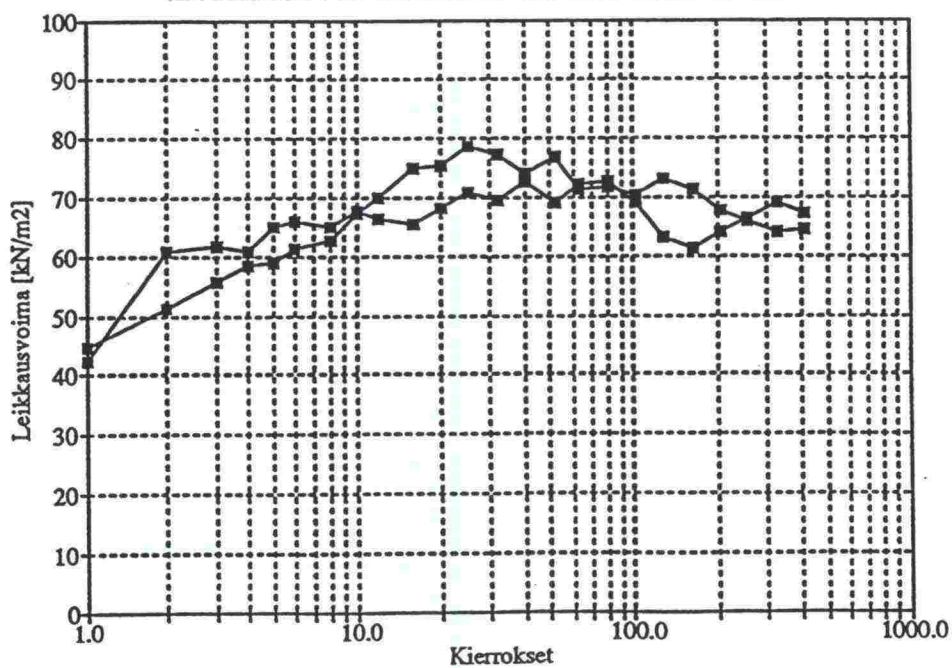


TUHKA 11 / 5 % + KF 5 % / SA 6,9 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

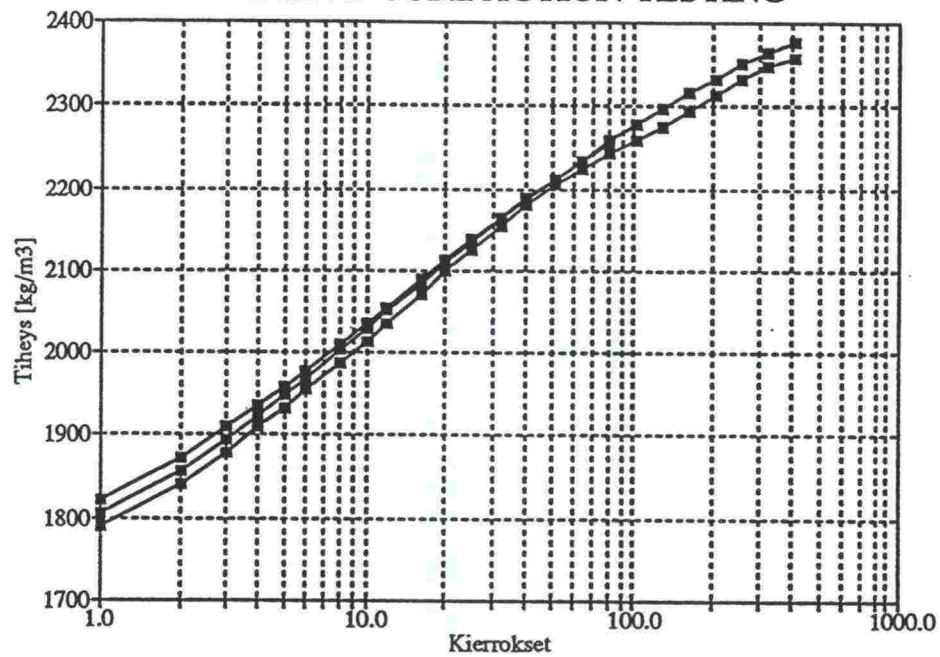


INTENSIVE COMPACTION TESTING

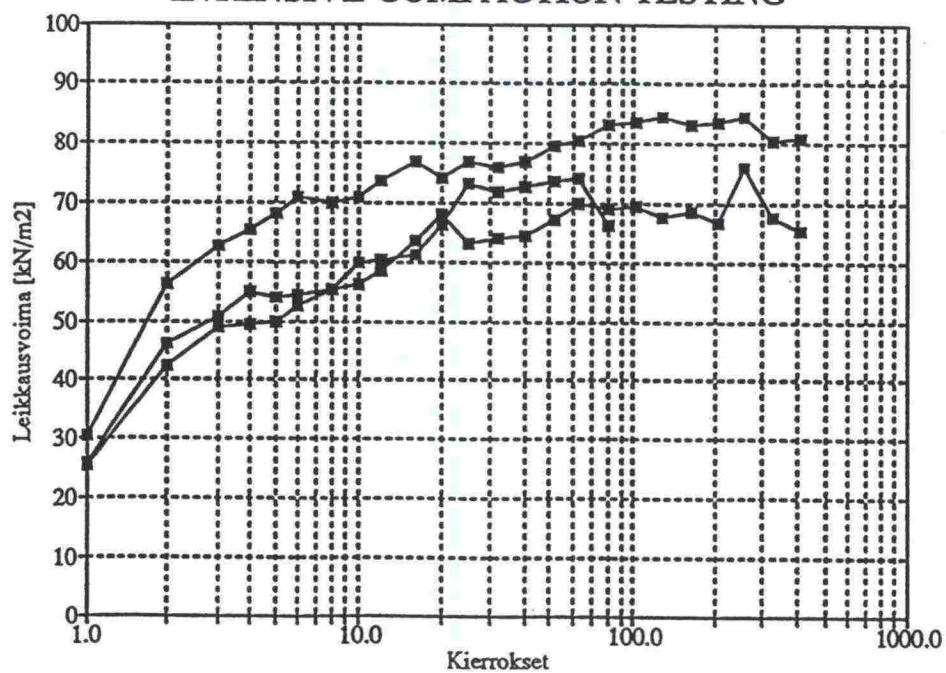


TUHKA 12 / LISÄYS 10 % / SA 6,1 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

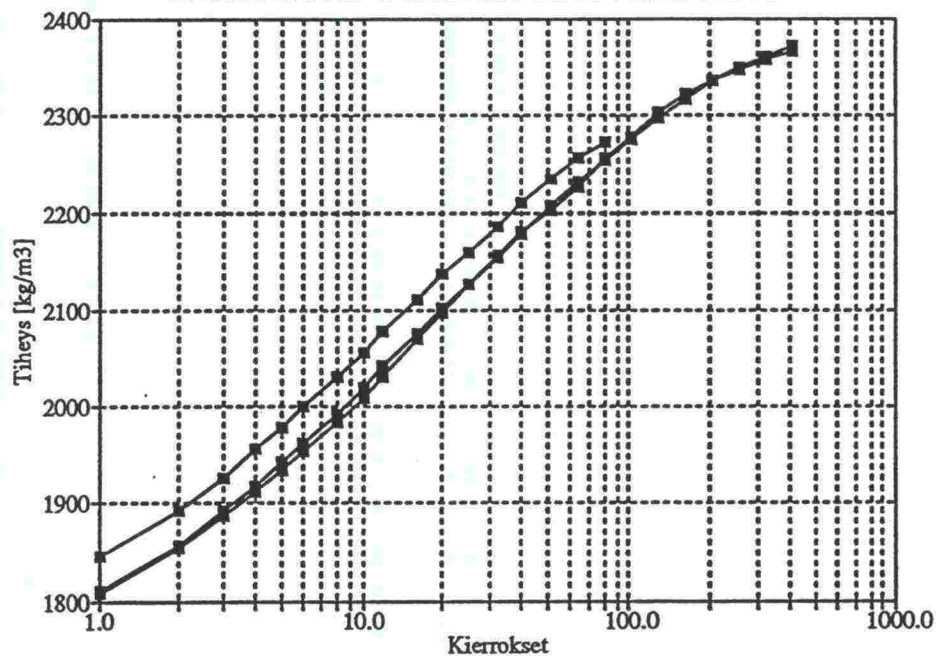


INTENSIVE COMPACTION TESTING

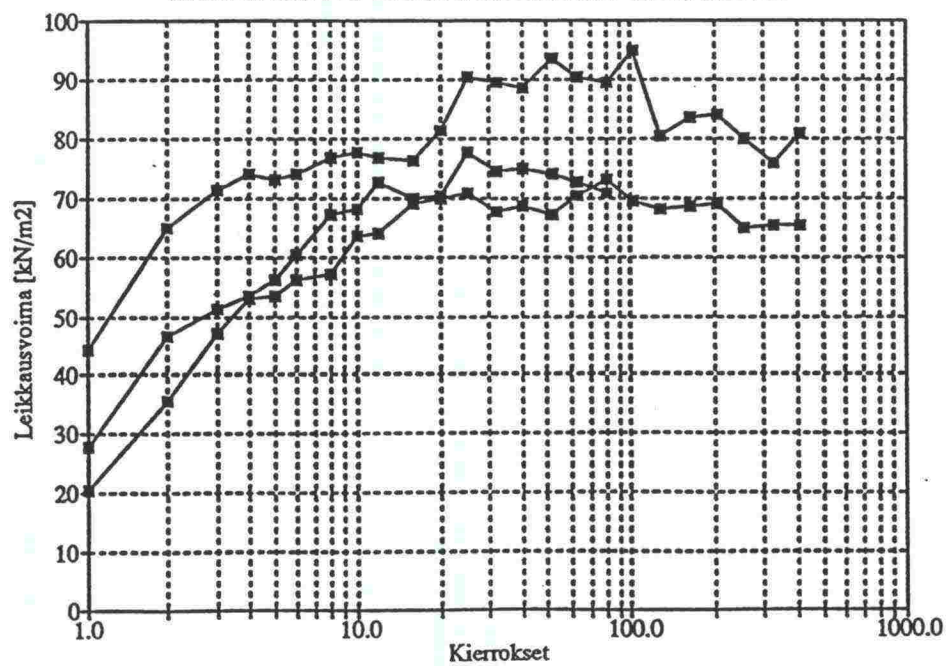


TUHKA 12 / LISÄYS 10 % / SA 6,5 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING

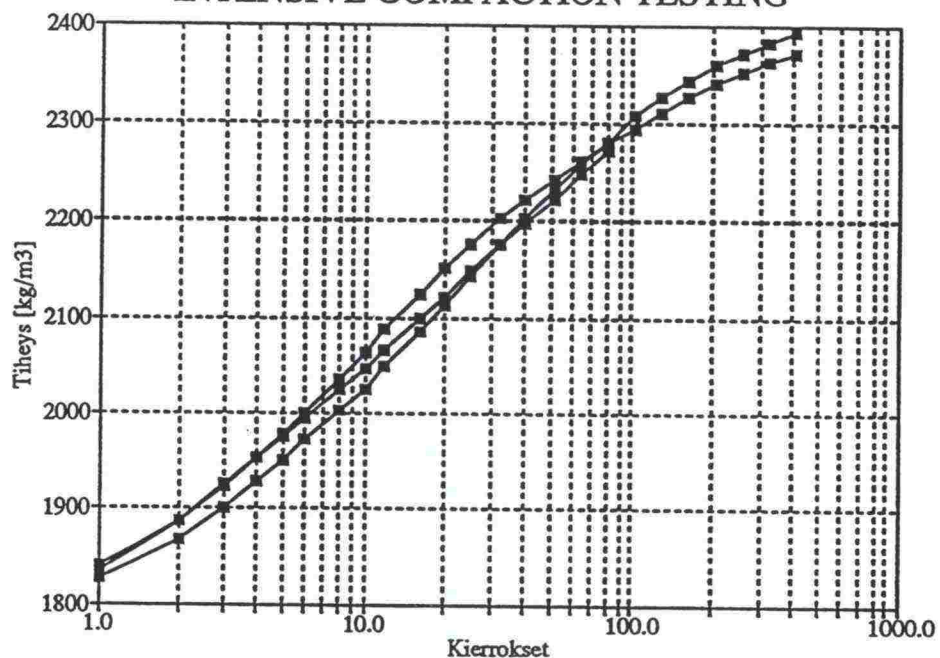


INTENSIVE COMPACTION TESTING

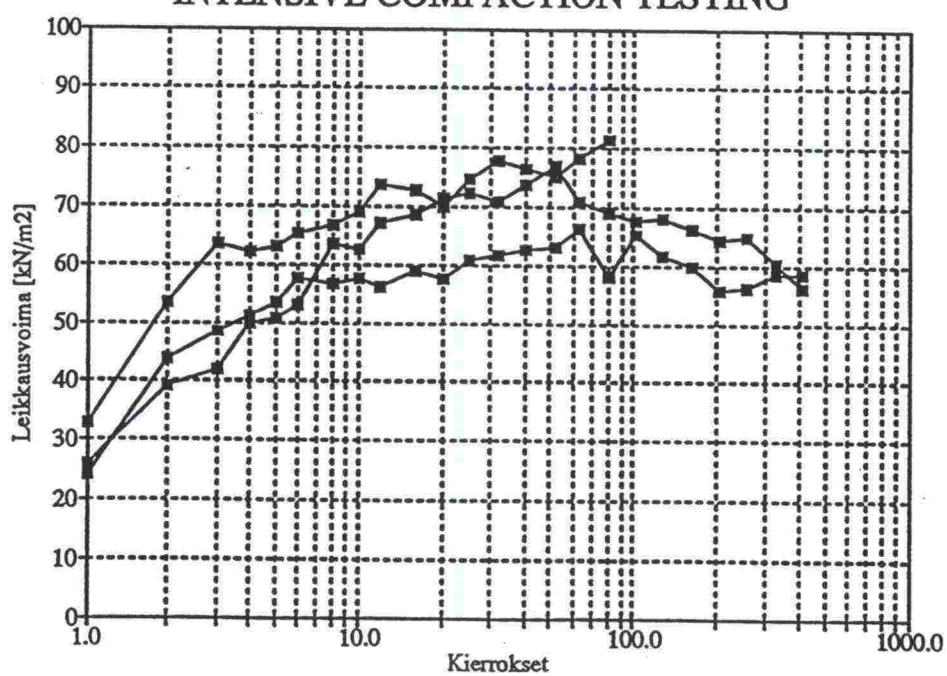


TUHKA 12 / LISÄYS 10 % / SA 6,9 %

INTENSIVE COMPACTION TESTING



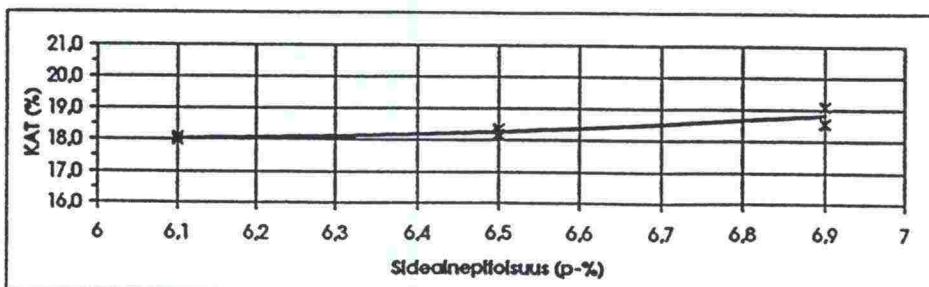
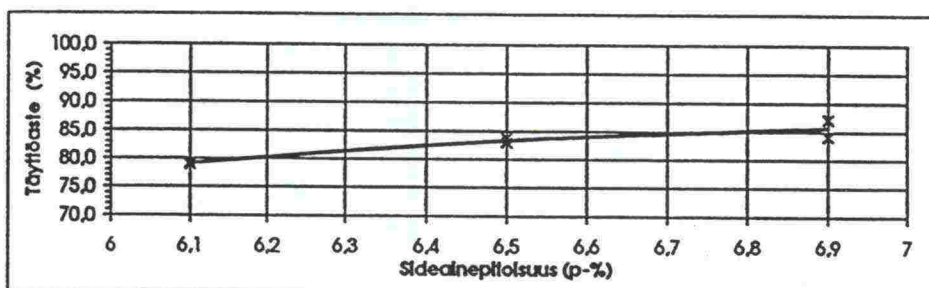
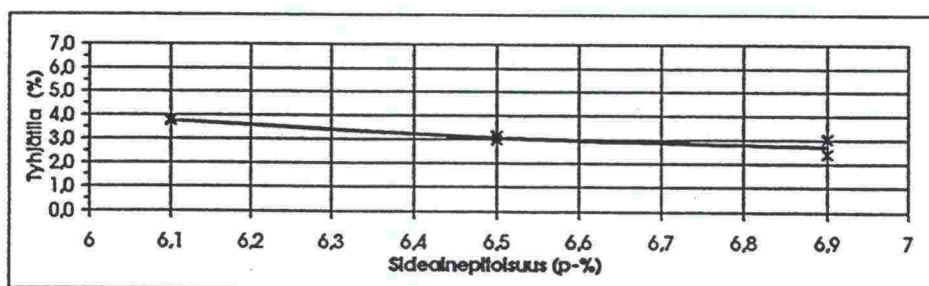
INTENSIVE COMPACTION TESTING



TUHKA 4 LISÄYS

Massa:	SMA 18	
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Koskenkylä	2730 kg/m ³
Täytejauhe:	KF/TUHKA 4	2734 kg/m ³
	Turvetuhkaa lis.	5,2 %

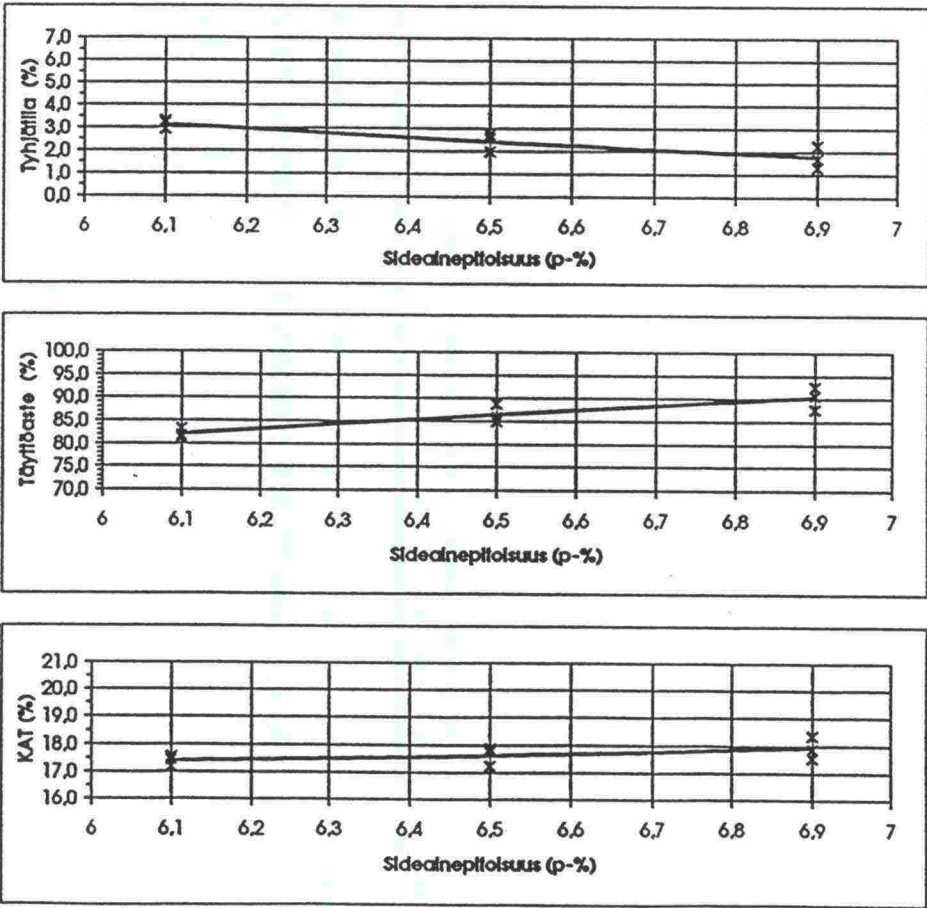
Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
											TT (%)	KAT (%)	TA (%)
SMA 18	6,1	14,4	2477	2108,8	1230,9	2115,2	2385	3,7	18,0	79,3			
SMA 18	6,1	14,4	2477	2102,8	1225,1	2107,6	2383	3,8	18,1	78,9			
											3,8	18,0	79,1
SMA 18	6,5	14,4	2462	2126,3	1237,4	2127,3	2389	3,0	18,2	83,7			
SMA 18	6,5	14,4	2462	2120	1234,3	2123,1	2385	3,1	18,3	82,9			
											3,0	18,3	83,3
SMA 18	6,9	14,4	2447	2123,9	1230,6	2125,5	2373	3,0	19,1	84,1			
SMA 18	6,9	14,4	2447	2122,8	1235,1	2123,7	2389	2,4	18,5	87,1			
											2,7	18,8	85,6



TUHKKA 5 LISÄYS

Massa:	SMA 18	
Sideaine:	B-80	1020 kg/m3
Kivi:	Koskenkylä	2730 kg/m3
Täytejanhe:	KF/TUHKKA 5	2605 kg/m3
	Turvetuhkaa lis.	5,5 %

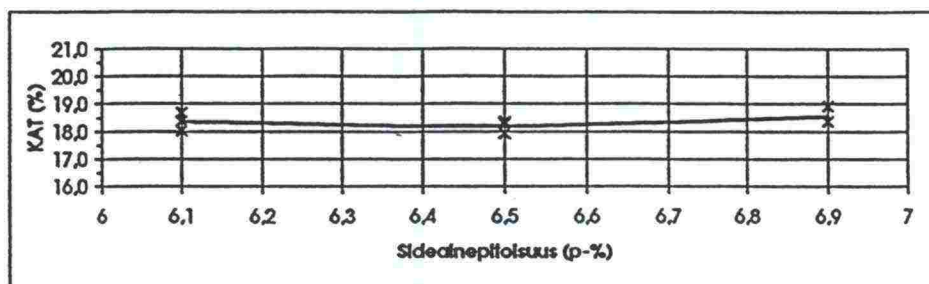
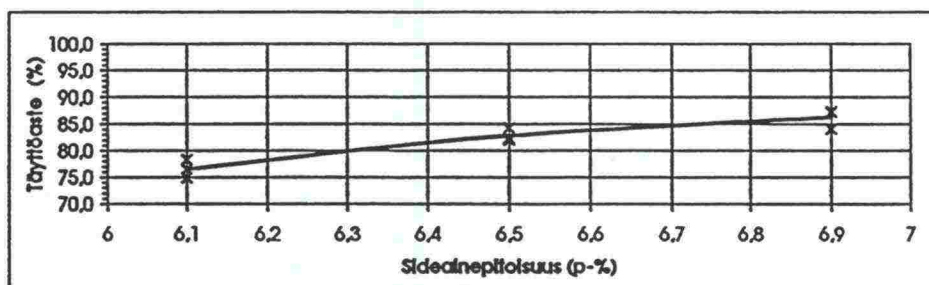
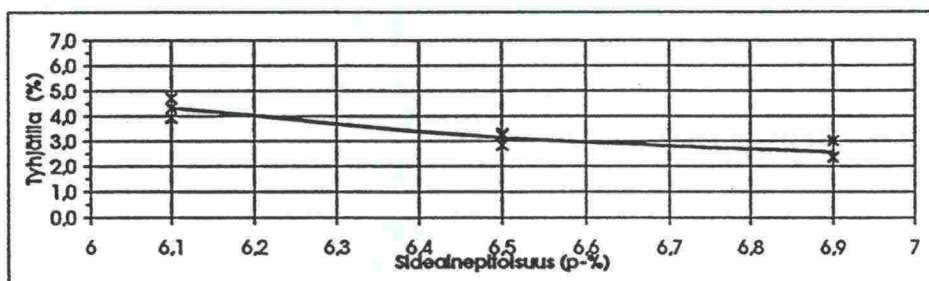
Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kivi (g)	Tlheys (kg/m³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
											TT (%)	KAT (%)	TA (%)
SMA 18	6,1	14,7	2462	2102,9	1225,4	2107,6	2384	3,2	17,4	81,8			
SMA 18	6,1	14,7	2462	2115,9	1232,2	2117,3	2391	2,9	17,2	83,1			
SMA 18	6,1	14,7	2462	2102,7	1222,2	2105,5	2381	3,3	17,5	81,1	3,1	17,4	82,0
SMA 18	6,5	14,7	2447	2109,8	1231,4	2110,7	2399	2,0	17,2	88,7			
SMA 18	6,5	14,7	2447	2121,4	1232,3	2123,2	2381	2,7	17,9	84,9			
SMA 18	6,5	14,7	2447	2102,6	1223	2104,4	2386	2,5	17,7	85,8	2,4	17,6	86,5
SMA 18	6,9	14,7	2433	2110,5	1228,2	2110,7	2392	1,7	17,9	90,5			
SMA 18	6,9	14,7	2433	2111,9	1225	2113,2	2378	2,3	18,3	87,7			
SMA 18	6,9	14,7	2433	2158,4	1259,7	2158,7	2401	1,3	17,5	92,6	1,8	17,9	90,3



TUHKA 5

Massa:	SMA 18	
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Koskenkylä	2730 kg/m ³
Täytejauhe:	KF/TUHKA 5	2515 kg/m ³
	(5%/8%)	

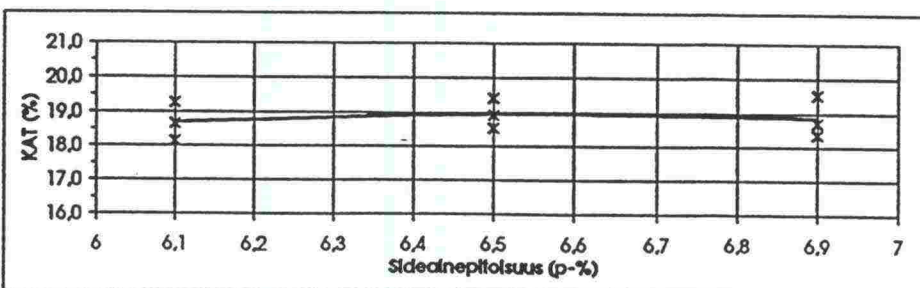
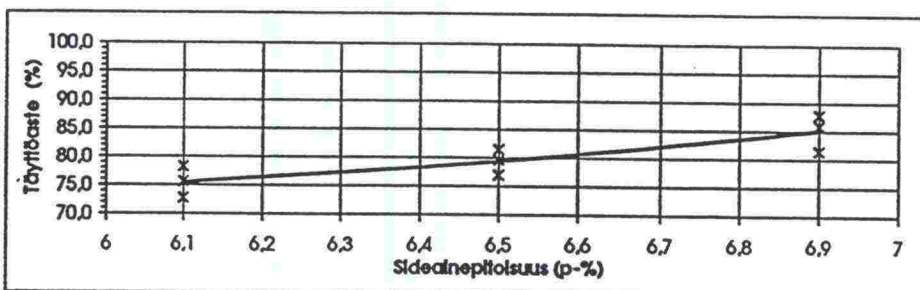
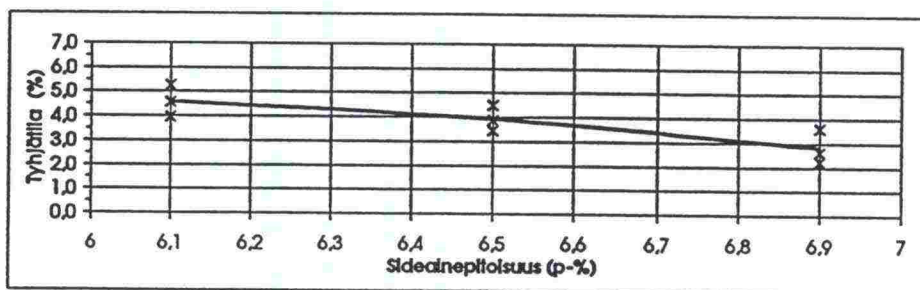
Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
											TT (%)	KAT (%)	TA (%)
SMA 18	6,1	13	2453	2001,2	1157,8	2013,6	2338	4,7	18,7	74,9			
SMA 18	6,1	13	2453	2015,5	1169,2	2024,2	2357	3,9	18,0	78,2			
SMA 18	6,1	13	2453	2010,5	1161,9	2018,4	2347	4,3	18,4	76,4	4,3	18,4	76,5
SMA 18	6,5	13	2439	2025,4	1171,4	2026	2370	2,8	17,9	84,2			
SMA 18	6,5	13	2439	2015,5	1165,4	2020,2	2358	3,3	18,3	81,9			
SMA 18	6,5	13	2439	2000,7	1157,1	2004,9	2360	3,2	18,3	82,3	3,1	18,2	82,8
SMA 18	6,9	13	2424	2029,4	1173,4	2030,6	2367	2,4	18,4	87,2			
SMA 18	6,9	13	2424	2033,7	1175,1	2033,9	2368	2,3	18,3	87,3			
SMA 18	6,9	13	2424	2026,2	1167,3	2029	2351	3,0	18,9	84,1	2,6	18,5	86,2



TUHKA 11 LISÄYS

Massa:	SMA 18	
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Koskenkylä	2730 kg/m ³
Täytejauhe:	KF/TUHKKA 11	2660 kg/m ³
Lisäaineet:	Turvetuhkaa lis.	3,6 %

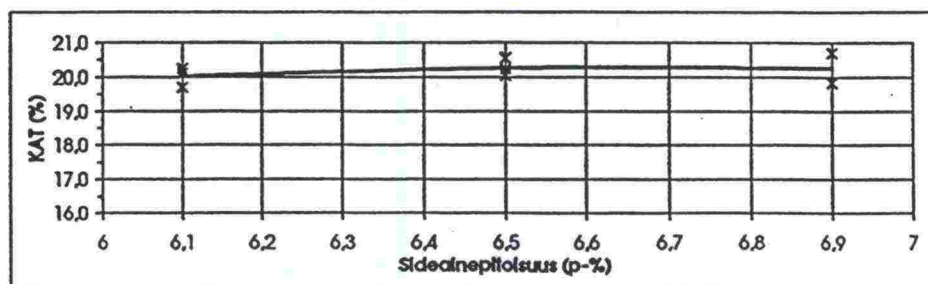
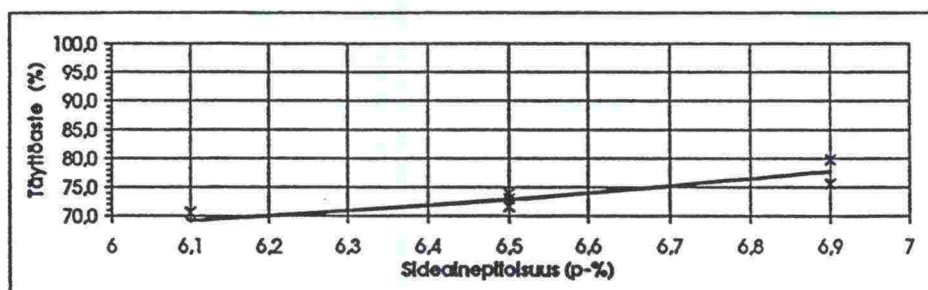
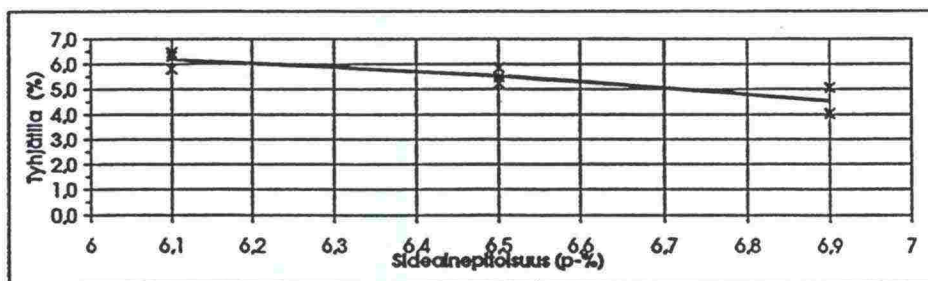
Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
											TT (%)	KAT (%)	TA (%)
SMA 18	6,1	13,1	2469	2062,3	1191,6	2066,6	2357	4,6	18,7	75,6			
SMA 18	6,1	13,1	2469	2064,9	1186,1	2068,7	2340	5,3	19,3	72,7			
SMA 18	6,1	13,1	2469	2089	1212,1	2092,9	2372	4,0	18,1	78,2	4,6	18,7	75,5
SMA 18	6,5	13,1	2455	2089,4	1206	2091,5	2360	3,9	18,9	79,5			
SMA 18	6,5	13,1	2455	2073,1	1191,4	2075,5	2345	4,5	19,4	77,0			
SMA 18	6,5	13,1	2455	2087,1	1208,9	2089,5	2370	3,4	18,5	81,4	3,9	19,0	79,3
SMA 18	6,9	13,1	2440	2088,3	1202,7	2090,7	2352	3,6	19,5	81,5			
SMA 18	6,9	13,1	2440	2094,7	1214,7	2096,4	2376	2,6	18,7	85,9			
SMA 18	6,9	13,1	2440	2083,4	1210,7	2084	2386	2,2	18,4	87,9	2,8	18,9	85,1



TUHKKA 11

Massa:	SMA 18	
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Koskenkylä	2730 kg/m ³
Täytejaube:	KF/TUHKKA 11	2590 kg/m ³
	(5%/5%)	

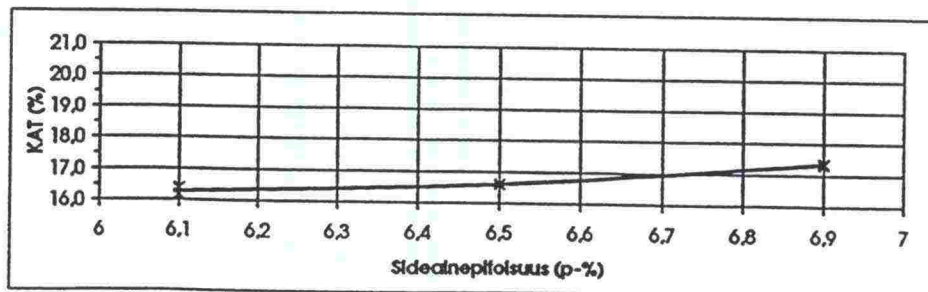
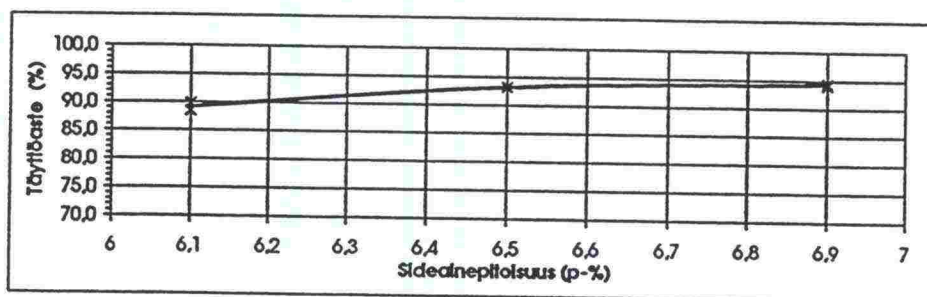
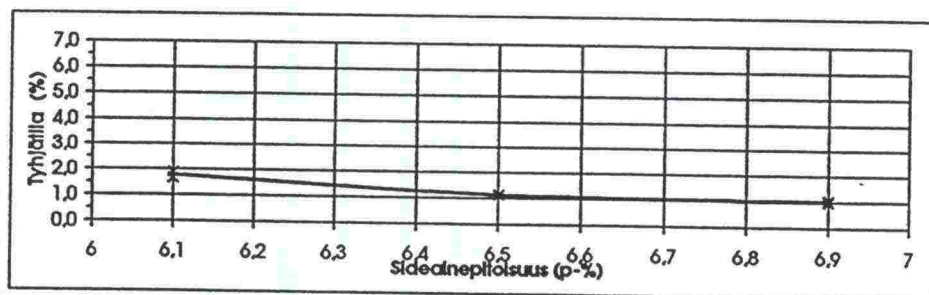
Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tilheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Kesklarvot		
											TT (%)	KAT (%)	TA (%)
SMA 18	6,1	10	2465	2001,7	1148	2016	2306	6,5	20,3	68,1			
SMA 18	6,1	10	2465	2013,6	1155,6	2027,2	2310	6,3	20,1	68,7			
SMA 18	6,1	10	2465	2005,7	1155,2	2018,8	2322	5,8	19,7	70,6	6,2	20,0	69,1
SMA 18	6,5	10	2451	2015,1	1149,8	2023,1	2307	5,8	20,5	71,6			
SMA 18	6,5	10	2451	2022,4	1160,5	2033,5	2317	5,5	20,2	73,0			
SMA 18	6,5	10	2451	1999,4	1146,9	2007,8	2322	5,2	20,0	73,9	5,5	20,3	72,8
SMA 18	6,9	10	2436	2031,1	1164,6	2033,2	2338	4,0	19,8	79,8			
SMA 18	6,9	10	2436	2029,4	1157,7	2035,1	2313	5,0	20,7	75,6			
											4,5	20,3	77,7



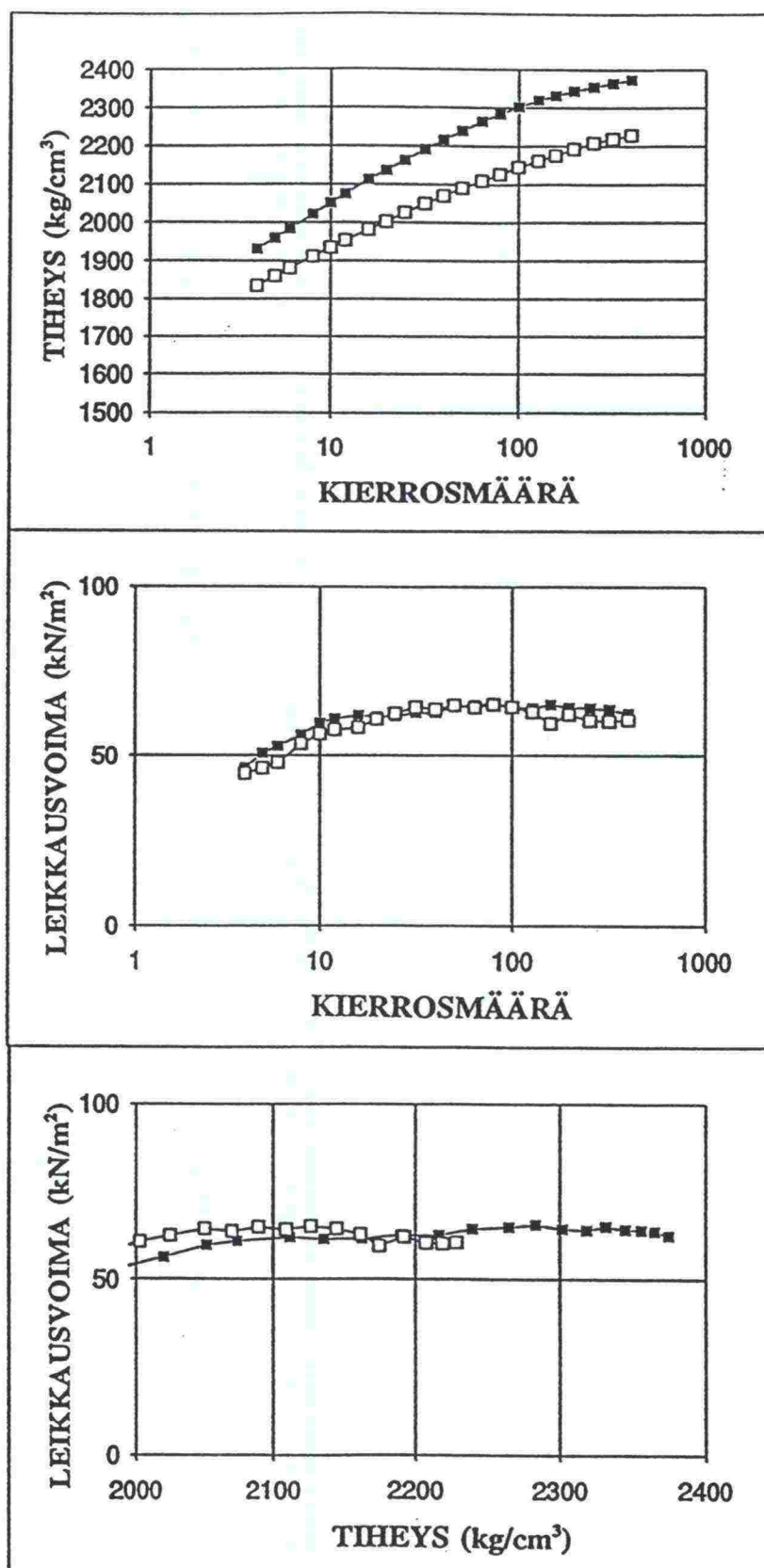
TUHKA 12 LISÄYS

Massa:	SMA 18	
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Koskenkylä	2730 kg/m ³
Täytejauhe:	KF/TUHKA 12	2680 kg/m ³
Lisäaineet:	Turvetuhkaa lis.	10 %

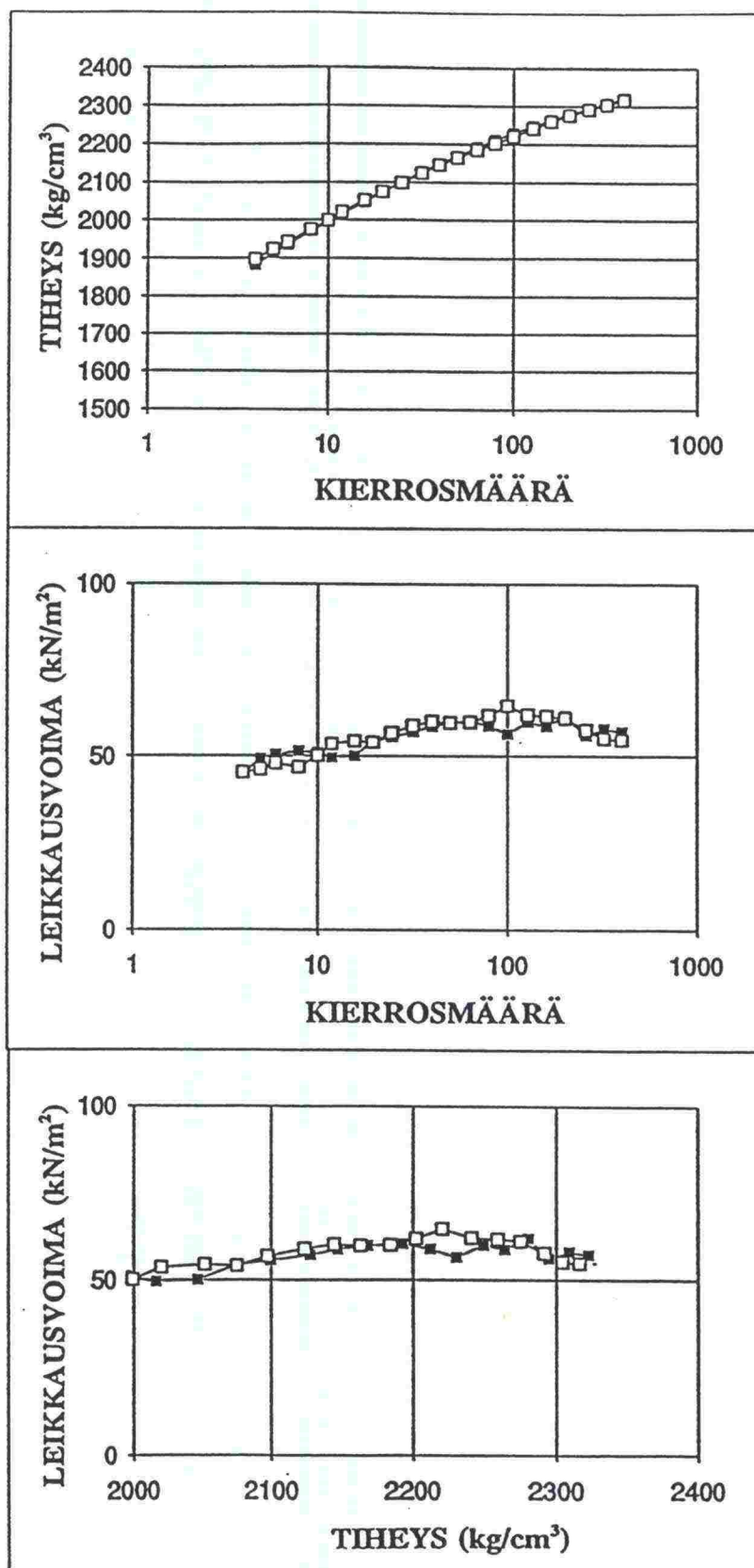
Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
											TT (%)	KAT (%)	TA (%)
SMA 18	6,1	18,2	2470	2104	1237,3	2105,7	2423	1,9	16,4	88,4			
SMA 18	6,1	18,2	2470	2107,1	1240,6	2108,1	2429	1,6	16,2	89,8			
SMA 18	6,5	18,2	2455	2101,8	1237	2103,1	2427	1,1	16,6	93,1	1,8	16,3	89,1
SMA 18	6,5	18,2	2455	2121,2	1247,9	2122	2427	1,1	16,6	93,1			
SMA 18	6,9	18,2	2440	2110,6	1237	2110,9	2415	1,0	17,4	94,1	1,1	16,6	93,1
SMA 18	6,9	18,2	2440	2120,6	1243,5	2121,1	2416	1,0	17,3	94,4			
											1,0	17,3	94,3



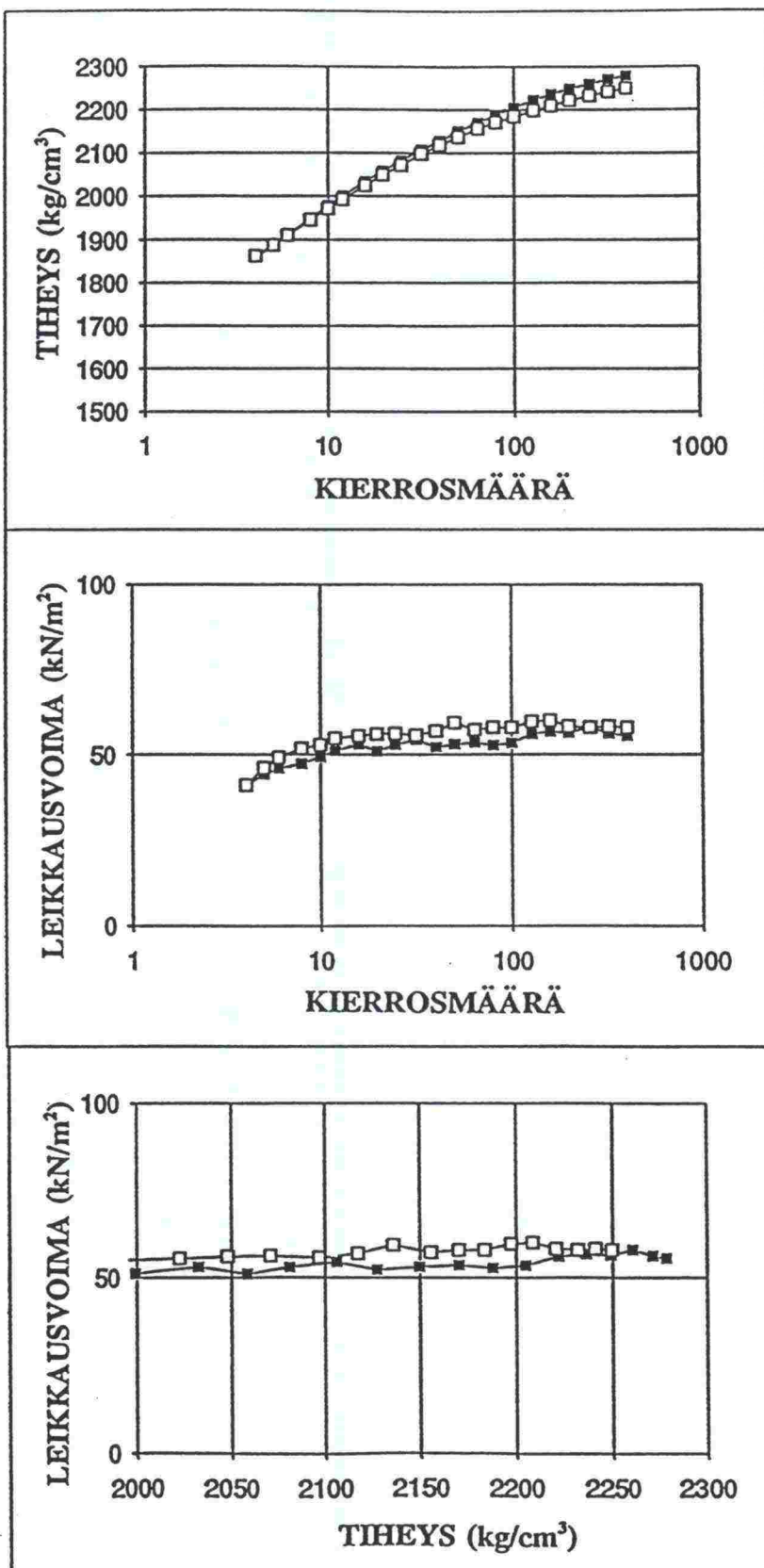
ICT 150 / TUHKA 5 / LISÄYS 5,5 %



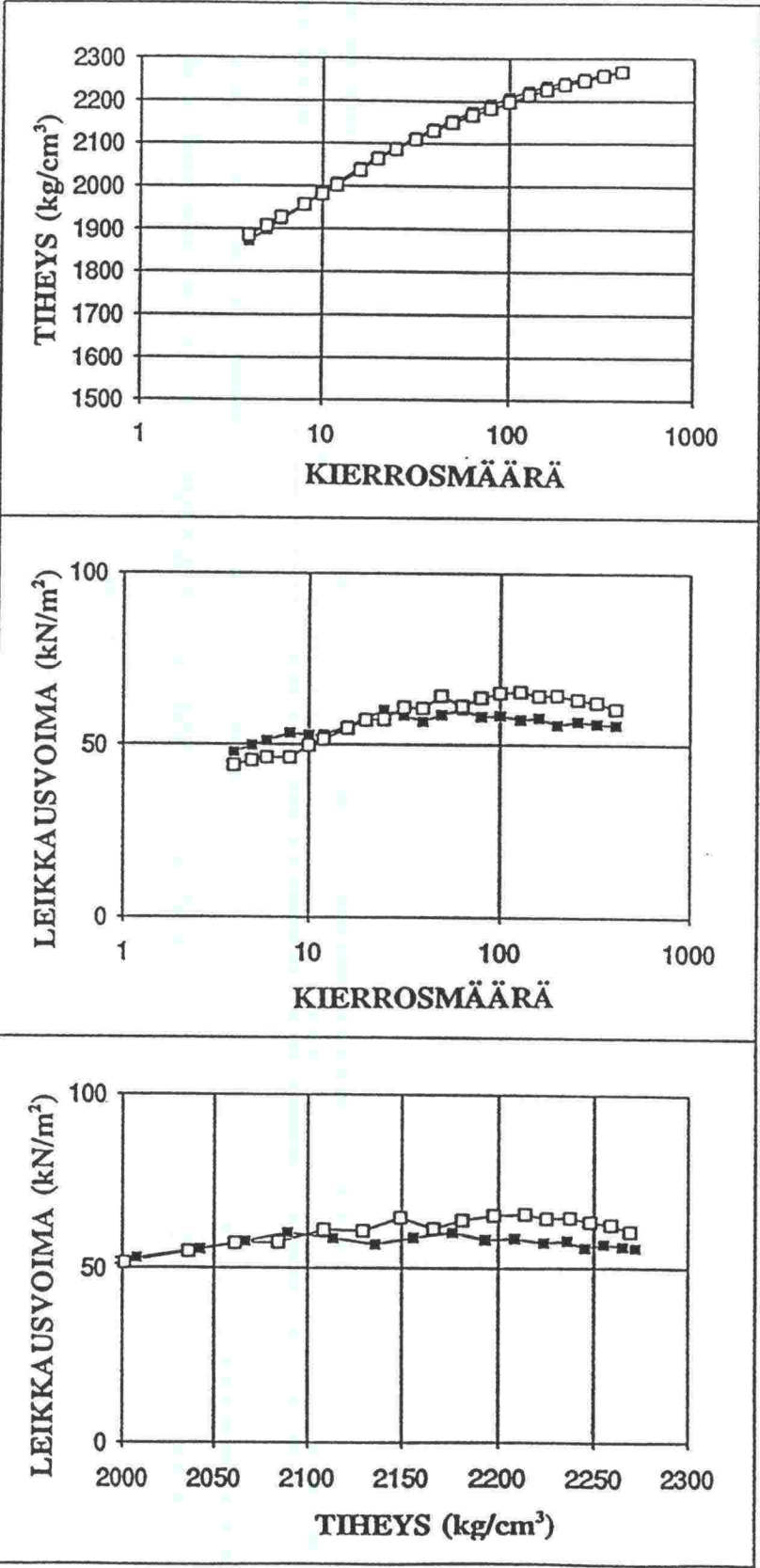
ICT 150 / TUHKA 5 / 8 % + KF 5 %



ICT 150 / TUHKA 11 / LISÄYS 3,6 %



ICT 150 / TUHKA 11 / 5 % + KF 5 %



KOEKAPPALEET
ICT 150:LLÄ TEHTYINÄ
H = 100 MM

Massa:	SMA 18	
Sideaine:	B-80	1020 kg/m3
Kivi:	Koskenkylä	2730 kg/m3
Täytejauhe:	KF JA	
	TURVETUHKA	

Massa		SAP	TJ-pit.	Teor. tih.	Tiheys	TT	KAT	TA	Keskimäärä		
		(%)	(%)	(kg/m³)	(kg/m³)	(%)	(%)	(%)	TT	KAT	TA
									(%)	(%)	(%)
SMA 18	KF + TUHKA 11 (5%/5%)	6,5	10	2451	2353	4,0	19,0	79,0			
SMA 18	KF + TUHKA 11 (5%/5%)	6,5	10	2451	2350	4,1	19,1	78,5			
									4,0	19,0	78,7
SMA 18	KF + TUHKA 11 LIS. 3,6 %	6,0	13,1	2473	2378	3,8	17,8	78,4			
SMA 18	KF + TUHKA 11 LIS. 3,6 %	6,0	13,1	2473	2401	2,9	17,0	82,9			
									3,4	17,4	80,6
SMA 18	KF + TUHKA 5 (5%/8%)	6,0	13	2457	2391	2,7	16,8	83,9			
SMA 18	KF + TUHKA 5 (5%/8%)	6,0	13	2457	2392	2,7	16,7	84,1			
									2,7	16,8	84,0
SMA 18	KF + TUHKA 5 LIS. 5,5%	5,5	14,7	2484	2418	2,7	15,7	83,1			
SMA 18	KF + TUHKA 5 LIS. 5,5%	6,0	14,7	2466	2426	1,6	15,9	89,8			
									2,1	15,8	86,4

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 86/1995 Valtatien 4:n Järvenpää-Mäntsälä-välin muuttuvan reittiopastusjärjestelmän vaikutukset. TIEL 3200361
- 87/1995 Moottoriväylien rinnakkaistiet; Esiselvitys alemman tieverkon ominaisuuksista ja suunnitteluperiaateista moottoriväylän liikennekäytävässä. TIEL 3200362
- 88/1995 Remixer-stabilointi. TIEL 3200363
- 89/1995 Lauttapaikkojen palvelutaso. TIEL 3200364
- 90/1995 Lossin ohjausköyttä korvaavat laitteistot. TIEL 3200365
- 91/1995 Heinolan ohikulkutien seurantatutkimus. TIEL 3200366
- 92/1995 Voidaanko henkilöautoliikennettä vähentää? TIEL 3200367
- 93/1995 PTM-auton mittaaman megakarkeuden soveltuvuus päällysteen tasaisuuden arviointiin. TIEL 3200368
- 94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
- 1/1996 Muuttuvien kelivaroitusmerkkien vaikutus ajonopeuksiin, aikaväleihin ja kuljettajien käsityksiin. TIEL 3200370
- 2/1996 Kestävä kehitys tiensuunnittelussa. TIEL 3200371
- 3/1996 Yleisten teiden ympäristön tila - luonto. TIEL 3200372
- 4/1996 Liittymien muutostoimenpiteiden vaikutus liikennekäyttäytymiseen - pyöräteiden ylityskohdat. TIEL 3200373
- 5/1996 Uudenmaan tiepiirin liikenteen hallintakeskuksen tehtävä ja toiminnot. TIEL 3200374
- 6/1996 Tuotannon laatu-, päällys- ja routarakenteet. TIEL 3200375
- 7/1996 Terminaaliivoituksen periaatteet. TIEL 3200376
- 8/1996 Yleisten teiden ympäristön tila - taajamat. TIEL 3200377
- 9/1996 Salaojan ympärysaineiden toiminta koerakenteessa; Loppuraportti TIEL 3200378
- 10/1996 Tielaitoksen toiminnan ympäristövaikutusten indikaattorit; Viitekehys TIEL 3200379
- 11/1996 Asfalttipäällysteen tyhjätilan mittausmenetelmien vertailu. TIEL 3200380
- 12/1996 Pärjäsimmekö vuoden 1970 tieverkolla? Tieverkon kehittymisen vaikutus kuljetus- ja tuotantotalouteen sekä kaupunkirakenteeseen. TIEL 3200381
- 13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
- 14/1996 Tieliiikenteen energiankulutus ja kaupunkirakenne - yhteyksiä eri kokoluokan taajamissa. TIEL 3200383